

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES
MEDIANTE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SUB SUPERFICIAL DE
FLUJO VERTICAL EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA Y LA
COMPOSICIÓN DEL MEDIO GRANULAR”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

CAROL CYNTHIA LARICO LARICO

ASESOR:

ING. JUAN CARLOS ALARCÓN CONDOR

LIMA - PERÚ

2021

DEDICATORIA

A DIOS por siempre guiar mis pasos, a mis padres, Santiago y Jesusa por siempre brindarme su amor y apoyo incondicional y a mis hermanos por siempre ser ese impulso de superación cada día.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos de la Universidad Nacional de Ingeniería (CITRAR-FIA-UNI), por acogerme durante todo el tiempo de desarrollo de la presente investigación, al personal que labora en el mismo centro de investigación, por su apoyo incondicional en la instalación, monitoreo y desmontaje de los humedales.

Al Ing. Juan Carlos Alarcón, por haberme guiado con su experiencia durante el proceso de desarrollo de mi investigación.

Un agradecimiento muy especial a Pedro Vega, quien siempre me brindó su apoyo incondicional en cada etapa del desarrollo de la investigación y por la confianza brindada hacia mi persona.

Asimismo, agradecer a mis amigos Manuel Moreno y Daniel Coronado por haberme brindado su apoyo y aliento en todo momento.

RESUMEN

La presente tesis de investigación fue realizada en las instalaciones del CITRAR-FIA-UNI con la finalidad de estudiar el efecto de la carga hidráulica y la combinación de sustratos con distintos espesores en la reducción de materia orgánica y nutrientes en los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical, para ello se construyó dos humedales artificiales de 1.00m x 1.00m de lado con una profundidad de 1.00m, considerando la altura del medio granular de 0.75m y un borde libre de 0.25m; la composición del medio granular del humedal H-1 fue de 0.20m de arena gruesa. 0.40m grava media (confitillo) y 0.15m de grava gruesa (piedra chancada) y para el caso del humedal H-2 fue de 0.40m de arena gruesa. 0.20m grava media (confitillo) y 0.15m de grava gruesa (piedra chancada). La macrófita sembrada en ambos humedales fue el *Cyperus alternifolius*.

El proceso de evaluación experimental del sistema de investigación tuvo una duración de 32 semanas, donde se evaluaron 4 cargas hidráulicas de 0.2m³/m²x12horas, 0.3m³/m²x12horas, 0.4m³/m²x12horas y 0.6m³/m²x12horas respectivamente, la evaluación se realizó de manera ascendente y cada etapa de evaluación tuvo una duración de 4 semanas, en cada etapa de evaluación se evaluó la eficiencia de reducción de los humedales para remover la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales, Nitrógeno Amoniacal, Nitritos, Nitratos, Nitrógeno Total, Fósforo Total y Coliformes Termotolerantes y el comportamiento diario de los parámetros básicos como temperatura ambiental, temperatura del agua residual, turbiedad, pH, conductividad, oxígeno disuelto, humedad relativa y el crecimiento de los vegetales.

De los resultados, se evidenció que las mayores eficiencias de reducción de la materia orgánica y nitrógeno amoniacal fue en la etapa 1 evaluada con una carga hidráulica 0.2m³/m²x12horas para los humedales H-1 y H-2, teniendo valores promedio de 95.26%, 81.49%, 84.31% y 90.55% para el humedal H-1 y de 97.35%, 86.61%, 88.56% y 96.06% para el humedal H-2 de los parámetros de DBO₅, DQO, SST, nitrógeno amoniacal respectivamente. Por otro lado, las mayores eficiencias de reducción del nitrógeno total, coliformes termotolerantes y fósforo total se encontraron en la etapa 2 evaluada para una carga hidráulica de

0.3m³/m²x12horas, teniendo valores promedio de toda la etapa de 27.00%, 99.55% y 23.46% para el humedal H-1 y de 25.40%, 99.96% y 20.37% para el humedal H-2 respectivamente para los parámetros mencionado.

Teniendo en cuenta la composición del medio granular de cada humedal evaluado, se demostró que el humedal H-2 presentó mejores eficiencias de reducción que el humedal H-1 para los parámetros evaluados de DBO₅, DQO, SST, nitrógeno amoniacal, nitritos, hierro total, coliformes termotolerantes y mayor aumento de la concentración de nitratos en todas las etapas que fueron evaluadas, caso contrario se observó en la evaluación del parámetro de nitrógeno total y fosforo total, donde el humedal H-1 presento mejores eficiencias de reducción en comparación al humedal H-2.

ABSTRACT

This research thesis was carried out at the CITRAR-FIA-UNI facilities in order to study the effect of hydraulic load and the combination of substrates with different thicknesses in the reduction of organic matter and nutrients in constructed subsurface flow wetlands vertical, for this, two artificial wetlands of 1.00m x 1.00m on each side were built with a depth of 1.00m, considering the height of the granular medium of 0.75m and a free edge of 0.25m; the composition of the granular medium of wetland H-1 was 0.20m of coarse sand. 0.40m medium gravel and 0.15m of coarse gravel (crushed stone) and in the case of the H-2 wetland it was 0.40m of coarse sand. 0.20m medium gravel and 0.15m coarse gravel (crushed stone). The macrophyte sown in both wetlands was *Cyperus alternifolius*.

The experimental evaluation process of the research system had a duration of 32 weeks, where 4 hydraulic loads of $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{hours}$, $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{hours}$, $0.4\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{hours}$ and $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{hours}$ respectively were evaluated, the evaluation was carried out in an ascending and each evaluation stage had a duration of 4 weeks, in each evaluation stage the efficiency of wetland reduction was evaluated to remove the Biochemical Oxygen Demand, Chemical Oxygen Demand, Total Suspended Solids, Ammoniacal Nitrogen, Nitrites, Nitrates, Total Nitrogen, Total Phosphorus and Thermotolerant Coliforms and the daily behavior of the basic parameters such as ambient temperature, residual water temperature, turbidity, pH, conductivity, dissolved oxygen, relative humidity and the growth of vegetables.

From the results, it was evidenced that the highest efficiencies for the reduction of organic matter and ammoniacal nitrogen were in stage 1 evaluated with a hydraulic head $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{hours}$ for wetlands H-1 and H-2, having average values of 95.26%, 81.49%, 84.31% and 90.55% for the H-1 wetland and 97.35%, 86.61%, 88.56% and 96.06% for the H-2 wetland of the parameters of BOD_5 , COD, SST, ammonia nitrogen respectively. On the other hand, the highest efficiencies for reducing total nitrogen, thermotolerant coliforms and total phosphorus were found in stage 2 evaluated for a hydraulic load of $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{hours}$, having average values of the entire stage of 27.00%, 99.55% and 23.46% for the H-1 wetland and

25.40%, 99.96% and 20.37% for the H-2 wetland respectively for the mentioned parameters.

Taking into account the composition of the granular medium of each evaluated wetland, it was shown that the H-2 wetland presented better reduction efficiencies than the H-1 wetland for the evaluated parameters of BOD₅, COD, TSS, ammonia nitrogen, nitrites, total iron, thermotolerant coliforms and a greater increase in the concentration of nitrates in all the stages that were evaluated, otherwise it was observed in the evaluation of the parameter of total nitrogen and total phosphorus, where the H-1 wetland presented better reduction efficiencies compared to the wetland H-2.

PRÓLOGO

La presente investigación, tesis denominada “REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES MEDIANTE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SUB SUPERFICIAL DE FLUJO VERTICAL EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA Y LA COMPOSICIÓN DEL MEDIO GRANULAR”, estudio y analizó el efecto de la carga hidráulica y la combinación de sustratos con distintos espesores en la reducción de materia orgánica y nutrientes en los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical. Esta investigación ha sido realizada para obtener el título profesional de Ingeniero Sanitario, el periodo de investigación y redacción ha durado desde enero del 2017 hasta diciembre del 2020.

He estructurado esta investigación en capítulos, comenzando con la información general, antecedentes y marco teórico, apartado que se dedica a describir los parámetros más importantes para el diseño de los humedales verticales; asimismo, los procesos biológicos para la reducción de los contaminantes en humedales artificiales; además, se brinda información de la metodología de la investigación y se muestra los resultados y su respectivo análisis; por último, se describen las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Estoy plenamente segura que los temas tratados en la presente investigación, va a generar discusiones importantes que permitirá contribuir para la mejora del sector saneamiento del Perú, por lo cual estaré plenamente satisfecha del enorme sacrificio, de largas noches de trabajo para ver al fin el fruto de un merecido esfuerzo.

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

RAMFLA: Reactor Anaerobio de Manto de Lodos y Flujo Ascendente (UASB)

CITRAR-FIA-UNI: Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos – Universidad Nacional de Ingeniería.

AFLUENTE: Agua residual que ingresa a un proceso de tratamiento.

EFLUENTE: Agua residual que sale de un proceso de tratamiento

H-1: Humedal Vertical con un medio granular conformado con 0.15m de piedra chancada ½", 0.40m de confitillo y 0.20 de arena gruesa.

H-2: Humedal Vertical con un medio granular conformado con 0.15m de piedra chancada ½", 0.20m de confitillo y 0.40 de arena gruesa.

PEAD: Polietileno de Alta Densidad

PVC: Policloruro de Vinilo

AH: Afluente de los Humedales

EH-1: Efluente del Humedal Vertical H-1

EH-2: Efluente del Humedal Vertical H-2

TRH: Tiempo de retención hidráulico

FIA: Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería

INDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT	VI
PRÓLOGO	VIII
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	IX
INDICE	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XV
1. CAPÍTULO I INFORMACIÓN GENERAL.....	1
1.1. Antecedentes referenciales	2
1.2. Planteamiento de la realidad problemática	6
1.2.1. Identificación del problema	6
1.2.2. Formulación de la realidad problemática	7
1.3. Justificación e importancia	7
1.4. Objetivos	8
1.4.1. Objetivo General.....	8
1.4.2. Objetivos Específicos	8
1.5. Hipótesis	9
1.6. Variables del estudio	9
1.6.1. Variables Independientes	9
1.6.2. Variables Dependientes.....	9
1.6.3. Variables Intervinientes	10
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y LEGAL.....	11
1.7. Marco Teórico	11
1.7.1. Humedales Artificiales	11
1.7.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical	12
1.7.2.1. Vegetación	13
1.7.2.2. Medio Granular.....	17
1.7.3. Reducción de los contaminantes en humedales artificiales	18
1.7.3.1. Materia en Suspensión.....	19
1.7.3.2. Materia Orgánica.....	19
1.7.3.3. Nitrógeno.....	21

1.7.3.4.	Fosforo	24
1.7.3.5.	Hierro Total.....	24
1.7.3.6.	Patógenos	24
1.7.4.	Influencia de la carga hidráulica	25
1.8.	Marco legal.....	26
3.	CAPÍTULO III METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN	27
3.1.	Ubicación de la investigación	27
3.2.	Descripción de la metodología	27
3.2.1.	Diseño experimental del sistema	27
3.2.2.	Cronograma de desarrollo	33
3.2.3.	Unidades experimentales	34
3.2.4.	Evaluación experimental del Sistema	39
3.3.	Puntos de monitoreos y parámetros requeridos	41
3.3.1.	Determinación de puntos de monitoreo	41
3.3.2.	Parámetros de medición y control.....	43
3.3.2.1.	Parámetros físicos.....	43
3.3.2.2.	Parámetros químicos y biológicos	43
3.3.3.	Cronograma de medición y control	43
3.3.4.	Protocolo de medición de parámetros evaluados	45
4.	CAPITULO IV OBTENCIÓN Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	49
4.1.	Análisis físico-químico	50
4.1.1.	Temperatura ambiental.....	50
4.1.2.	Temperatura del agua residual	52
4.1.3.	pH.....	56
4.1.4.	Oxígeno disuelto.....	57
4.1.5.	Turbiedad	59
4.1.6.	Conductividad.....	63
4.1.7.	Humedad Relativa	64
4.1.8.	Adaptación y crecimiento del <i>Cyperus Alternifolius</i>	64
4.1.8.1.	Tasa de crecimiento de los vegetales.....	67
4.1.8.2.	Raíces de los vegetales.....	72
4.1.9.	Tiempo de retención hidráulico (TRH)	75
4.2.	Análisis biológicos	76
4.2.1.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	77
4.2.2.	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	79
4.2.3.	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	80

4.2.4.	Nitrógeno Amoniacal	83
4.2.5.	Nitrito.....	86
4.2.6.	Nitrato.....	88
4.2.7.	Nitrógeno Total.....	90
4.2.8.	Fósforo Total	92
4.2.9.	Hierro Total.....	94
4.3.	Análisis microbiológicos	95
4.3.1.	Coliformes termotolerantes.....	95
4.4.	Mayores eficiencias de reducción para los humedales H-1 y H-2.....	97
5.	CONCLUSIONES	99
6.	RECOMENDACIONES	103
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
8.	ANEXOS.....	107
8.1.	ANEXO N° 1 – POROSIDAD DE CADA SUSTRATO DEL MEDIO GRANULAR.....	107
8.2.	ANEXO N° 2 – DISEÑO DEL HUMEDAL VERTICAL.....	108
8.3.	ANEXO N° 3 – TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO	111
8.4.	ANEXO N° 4 – RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	114
8.5.	ANEXO N° 5 – PANEL FOTOGRÁFICO	122
8.5.1.	Implementación del sistema de investigación.....	122
8.5.2.	Desarrollo de las plantas durante todo el proceso de evaluación experimental	123
8.5.3.	Medición del tiempo de retención	126
8.5.4.	Desmontaje del sistema de investigación	126
8.6.	ANEXO N° 6 – PLANO DEL SISTEMA DE INVESTIGACIÓN.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1 Clasificación de los humedales artificiales (Morales et al., 2013) (Kadlec & Wallace, 2009)	11
Figura II-4 Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (Gunter et al, 2017)	13
Figura II-5 <i>Cyperus Alternifolius</i> en un humedal vertical	16
Figura II-6 Distribución del medio granular para un tratamiento secundario.....	18
Figura III-1 Ubicación de la investigación.....	27
Figura III-2 Distribución de los sustratos en el medio granular del Humedal H-1	30
Figura III-3 Distribución de los sustratos en el medio granular del Humedal H-2	30
Figura III-4 Esquema de la investigación	34
Figura III-5 Sistema de distribución del caudal.....	36
Figura III-6 Sistema de recolección de agua tratada	36
Figura III-7 Sistema de ventilación.....	36
Figura III-8 Distribución de cada sistema de tuberías en el humedal H-1.....	37
Figura III-9 Ubicación de puntos de monitoreo en el sistema de investigación...	42
Figura IV-1 Tamaño de la raíz del vegetal plantado.....	65
Figura IV-2 Codificación y distribución de vegetales plantados en el humedal vertical H-1	66
Figura IV-3 Codificación y distribución de vegetales plantados en el humedal vertical H-2	66
Figura IV-4 Acondicionamiento de los vegetales.....	66
Figura IV-5 Vegetales al finalizar el proceso de evaluación del sistema	72
Figura IV-6 Corte longitudinal del medio granular del humedal	72
Figura IV-7 Vista en microscopio de la raíz en la arena gruesa	73
Figura IV-8 Vista en microscopio de la raíz en el confitillo	73
Figura IV-9 Vista en microscopio de la raíz en la grava	74
Figura IV-10 Formación de una malla gruesa de raíces en el fondo del humedal	74
Figura VIII-1 Humedales H-1 y H-2 contruidos de material noble.....	121
Figura VIII-2 Prueba hidráulica de los humedales.....	121
Figura VIII-3 Lavado del sustrato de grava gruesa (piedra chancada)	121
Figura VIII-4 Tamizado del sustrato grava gruesa (piedra chancada)	121
Figura VIII-5 Sustrato de grava gruesa tamizado	121
Figura VIII-6 Tamizado del sustrato grava media (confitillo).....	122
Figura VIII-7 Lavado del sustrato de arena gruesa	122
Figura VIII-8 Llenado del sustrato grava media (confitillo) a los humedales	122
Figura VIII-9 Llenado del sustrato arena gruesa a los humedales.....	123
Figura VIII-10 Nivelación de la superficie del medio granular.....	123
Figura VIII-11 Medición de la porosidad del sustrato grava media (confitillo) ...	124
Figura VIII-12 Medición de la porosidad del sustrato arena gruesa.....	124
Figura VIII-21 Plantas del humedal H-1 en la semana 1	124
Figura VIII-22 Plantas del humedal H-2 en la semana 1	124
Figura VIII-23 Plantas del humedal H-1 en la semana 3	124
Figura VIII-24 Plantas del humedal H-2 en la semana 3	124
Figura VIII-25 Plantas del humedal H-1 en la semana 5	124
Figura VIII-26 Plantas del humedal H-2 en la semana 5	124
Figura VIII-27 Plantas del humedal H-1 en la semana 7	124
Figura VIII-28 Plantas del humedal H-2 en la semana 7	124

Figura VIII-29 Plantas del humedal H-1 en la semana 13	125
Figura VIII-30 Plantas del humedal H-2 en la semana 13	125
Figura VIII-31 Plantas del humedal H-1 en la semana 15	126
Figura VIII-32 Plantas del humedal H-2 en la semana 15	126
Figura VIII-33 Plantas del humedal H-1 en la semana 20	126
Figura VIII-34 Plantas del humedal H-2 en la semana 20	126
Figura VIII-35 Plantas del humedal H-1 y H-2 en la semana 32	126
Figura VIII-36 Materiales utilizados	126
Figura VIII-37 Momento de la medición	126
Figura VIII-38 Corte longitudinal del medio granular del Humedal H-2.....	126

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1 Temperatura Ambiental promedio en cada etapa de evaluación	51
Gráfico 4-2 Variación de la temperatura ambiental promedio mensual	51
Gráfico 4-3 Temperatura Promedio en cada etapa de evaluación	52
Gráfico 4-4 Variación promedio mensual de la temperatura ambiental y del agua residual.....	55
Gráfico 4-5 pH promedio en cada etapa de evaluación	57
Gráfico 4-6 Oxígeno Disuelto promedio en cada etapa de evaluación	58
Gráfico 4-7 Turbiedad promedio en cada etapa de evaluación	61
Gráfico 4-8 Turbiedad durante las etapas de evaluación	62
Gráfico 4-9 Conductividad promedio en cada etapa de evaluación.....	63
Gráfico 4-10 Humedad Relativa y temperatura ambiental promedio en cada etapa de evaluación	64
Gráfico 4-11 Altura de los vegetales sembrados en el humedal vertical H-1	67
Gráfico 4-12 Altura de los vegetales sembrados en el humedal vertical H-2.....	68
Gráfico 4-13 Altura promedio de los vegetales en cada humedal	68
Gráfico 4-14 Tiempo de retención del humedal H-1	75
Gráfico 4-15 Tiempo de retención del humedal H-2.....	76
Gráfico 4-16 DBO ₅ y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación	79
Gráfico 4-17 DQO y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación	81
Gráfico 4-18 Sólidos Suspendidos Totales y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación	84
Gráfico 4-19 Nitrógeno Amoniacal y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación.....	86
Gráfico 4-20 Nitrito y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación	88
Gráfico 4-21 Nitrito promedio en cada etapa de evaluación.....	90
Gráfico 4-22 Nitrógeno Total y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación	92
Gráfico 4-23 Fósforo Total y su eficiencia de reducción en cada etapa de evaluación	94
Gráfico 4-24 Hierro Total en la etapa 4	95
Gráfico 4-25 Coliformes Termotolerantes y su eficiencia de reducción en cada etapa de evaluación.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1 Resumen de composición de medio granular de las investigaciones	5
Tabla II-1 La taxonomía del vegetal <i>Cyperus alternifolius</i> (Sanz, Dana, & Sobrino, 2004)	15
Tabla III-8 Equipos y herramientas utilizados para el proceso de evaluación experimental	30
Tabla III-9 Características hidráulicas de cada etapa del sistema	33
Tabla III-10 Desarrollo y duración de cada etapa del sistema*	33
Tabla III-11 Características de funcionamiento de cada etapa de evaluación	35
Tabla III-12 Características generales de cada etapa de evaluación	40
Tabla III-13 Características de funcionamiento de cada etapa de la evaluación	41
Tabla III-14 Monitoreos realizados por semana para cada etapa	44
Tabla III-15 Frecuencia de medición de los parámetros por cada etapa	46
Tabla III-16 Metodología aplicada para evaluar cada parámetro	47
Tabla IV-2 pH máximo, mínimo y promedio en cada etapa de evaluación	56
Tabla IV-4 Turbiedad máxima, mínima y promedio en cada etapa de evaluación	59
Tabla IV-6 Tasa de crecimiento promedio de los vegetales del humedal vertical H-1 en cada etapa de evaluación	70
Tabla IV-7 Tasa de crecimiento promedio de los vegetales del humedal vertical H-2 en cada etapa de evaluación	70
Tabla IV-8 Tasa de crecimiento promedio del vegetal en cada etapa de evaluación para cada humedal	70
Tabla IV-16 Hierro Total y su eficiencia de reducción en la etapa 4	94
Tabla IV-17 Resumen de las eficiencias de reducción de los contaminantes para el humedal H-1	98
Tabla IV-18 Resumen de las eficiencias de reducción de los contaminantes para el humedal H-2	98
Tabla VIII-1 Calculo de la porosidad de la arena gruesa	107
Tabla VIII-2 Calculo de la porosidad del confitillo – grava de 5-10mm	108
Tabla VIII-3 Calculo de la porosidad de la piedra chancada – grava de 20-40mm	108
Tabla VIII-4 Conductividad de los humedales H-1 y H-2 en el tiempo	112
Tabla VIII-5 Resultados diarios de la temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad y turbiedad para los puntos de monitoreo	114
Tabla VIII-6 Resultados del promedio semanal de los parámetros diarios para los puntos de monitoreo y de la temperatura ambiental y humedad relativa	118
Tabla VIII-7 Resultados de los parámetros semanales para el punto de monitoreo AH	118
Tabla VIII-8 Resultados de los parámetros semanales para el punto de monitoreo EH-1	120
Tabla VIII-9 Resultados de los parámetros semanales para el punto de monitoreo EH-2	120

1. CAPÍTULO I INFORMACIÓN GENERAL

Los humedales artificiales son un sistema de depuración natural, denominados como una tecnología no convencional para el tratamiento principalmente de aguas residuales domésticas, los cuales fueron construidos por el hombre, inspirados en la capacidad de los humedales naturales para mejorar la calidad del agua a través de la reducción de contaminantes.

De acuerdo con el tipo de circulación del agua residual en los humedales artificiales se han clasificado en flujo superficial y flujo subsuperficial, este último se subclasificó en horizontales y verticales; es donde se han realizado distintas investigaciones en los humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal y vertical.

Los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical fueron desarrollados ampliamente en Europa, y han demostrado una excelente eficiencia de reducción de sólidos suspendidos, materia orgánica y Nitrógeno amoniacal. Estos son sistemas donde el agua residual fluye a través del medio granular en dirección vertical, entrando en contacto con los microorganismos que se han desarrollado a través de biopelículas en la superficie del medio granular y raíces de los vegetales, desarrollándose una serie de procesos físicos, químicos y biológicos interrelacionados.

Actualmente la aplicación de este tipo de humedales se encuentra en constante crecimiento, debido a su bajo costo de inversión, mínimo consumo de energía, bajo costo de operación y baja generación de lodos en comparación de otros sistemas de tratamiento convencionales de aguas residuales tales como Lodos activados y lagunas aireadas; en comparación con los humedales del tipo horizontal, los humedales verticales necesitan una menor superficie para tratar una determinada carga orgánica (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Debido a su buen funcionamiento, eficiencias de reducción y bajos costos de inversión y operación como ya fueron mencionados en párrafos anteriores, este tipo de sistema de tratamiento resulta ser una solución viable para la implementación de sistemas de tratamientos de aguas residuales para viviendas multifamiliares, universidades y comunidades rurales.

En la presente investigación se implementará dos humedales artificiales subsuperficial de flujo vertical, donde el medio granular heterogéneo se encuentra conformado por arena gruesa, grava media y grava gruesa, su altura total será de 0.75m y serán plantados ambos humedales con la macrófita *Cyperus Alternifolius*; donde se estudiará el efecto que tiene la variación de la carga hidráulica y la combinación de sustratos con distintos espesores de capas.

1.1. Antecedentes referenciales

Los humedales artificiales o también llamados humedales construidos, son tecnologías no convencionales utilizadas para el tratamiento de aguas residuales principalmente domésticas. En los últimos veinte (20) años se han desarrollado en Europa (Francia) los humedales artificiales sub-superficiales de flujo vertical como una mejora a los humedales horizontales para mejorar la reducción de nitrógeno.

En el año 2012 los investigadores Rodríguez et al., estudiaron 2 humedales de flujo vertical, que fueron alimentados con el efluente de un proceso fisicoquímico de una estación depuradora de aguas residuales; en uno de los humedales se plantó la especie *Iris pseudacorus* (HFV2) y en el otro humedal fue condicionado sin ninguna planta (HFV4). La composición del medio granular para ambos humedales fueron de espesor de 20cm de arena, 10cm de turba, 40cm de gravilla y 10cm de grava. Para el estudio se consideraron tres (03) fases experimentales con distintas cargas hidráulicas de: 0.042 m³/m²xdía, 0.083 m³/m²xdía y 0.166 m³/m²xdía (según el orden que fueron evaluadas en cada humedal); en el humedal HFV2 la eliminación de DQO fue de 81% y en el humedal HFV4 fue de 68%; la eliminación de DQO no tuvo variaciones significativas en relación con la carga hidráulica y carga orgánica. La eficiencia de reducción de nitrógeno amoniacal fue de 75 a 96% en el humedal HFV2 y de 66 a 83% en el humedal HFV4; la mejor eficiencia de reducción de los parámetros evaluados se obtuvo para la carga hidráulica de 0.042 m³/m²xdía. En cuanto a la eficiencia de reducción de sólidos en suspensión fueron muy bajos para las dos primeras fases, la mayor eliminación se obtuvo para la máxima carga hidráulica evaluada.

Por otro lado, en el año 2015, Bohórquez Bedoya, evaluó el tratamiento de aguas residuales domésticas en diferentes configuraciones de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical; en total fueron 8 humedales estudiados (H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7 y H8), cada uno con 3 variables independientes, entre ellos: el uso de sustrato (arena o grava media), la frecuencia de alimentación y la presencia o ausencia de macrófitas. Los humedales H1 y H3 presentaron un medio granular compuesto por 0.80m de arena, de manera similar, los humedales H5 y H7 presentaron un medio granular compuesto por 0.80m de grava media; siendo la diferencia entre cada par de humedales la frecuencia de alimentación de 20 pulsaciones x día y 10 pulsaciones x día respectivamente. Los resultados revelaron que los humedales H1 y H3 presentaron una mayor eficiencia de reducción de contaminantes que los humedales H5 y H7, obteniendo los siguientes valores: 91.6% y 91.2% DQO, 96.5% y 96.8% DBO₅, 87.2% y 88.6% SST, 82.8% y 82.8% NH₄⁺ para humedales H1 y H3 respectivamente; asimismo 59.0% y 46.9% DQO, 52.1% y 41.8% DBO₅, 0% y 0% SST, 45.0% y 41.7% NH₄⁺ para humedales H5 y H7 respectivamente; cabe mencionar que, todos los humedales fueron evaluados para una misma carga hidráulica de 0.15 m³/m²xdía; asimismo, se corroboró que los humedales con medio granular de arena tuvieron una mayor eficiencia de reducción de DBO₅ en referencia a los humedales con medio granular de grava media; por otro lado, la tesista tuvo inconvenientes para la operación y mantenimiento de los humedales con medio granular de arena debido a las constantes inundaciones o periodos de descanso para descolmatar el medio granular.

En la investigación realizada por Gómez Lordan en el 2017, se evaluó el comportamiento y la potencialidad fitodepuradora de dos tipos de plantas, estas plantas fueron *Cyperus alternifolius* y *Crysopogon zizanioides* las cuales fueron sembrados en dos humedales artificiales de flujo vertical con un medio granular compuesto por 0.60m arena gruesa y 0.20m grava media, donde cada humedal opero con una carga hidráulica de 0.164 m³/m²xdía por un tiempo de diez meses. Los resultados de este estudio, para el humedal sembrado con *Cyperus alternifolius* fue de 98.60%, 93.00%, 89.10% y 98.20% para los parámetros de DBO₅, DQO, SST y NH₄⁺ respectivamente. Mientras

que para el humedal con *Crysopogon zizanioides* los resultados fueron de 96.40%, 90.10%, 87.17% y 93.80% para los parámetros de DBO₅, DQO, SST y NH₄⁺ respectivamente.

Por otra parte, Torbisco Sáenz en el 2017 implementó dos humedales artificiales de flujo vertical con un medio granular compuesto por una combinación de diferentes sustratos con espesor de 0.50m arena gruesa, 0.15m grava media y 0.15m grava gruesa y evaluados para una carga hidráulica alta de 0.577 m³/m²xdía, el humedal HV 1 fue sembrado con *Chrysopogon Zizanioides* y el humedal HV 2 no tuvo plantas sembradas; en ambos humedales se evaluó la eficiencia para reducir DBO₅, DQO y SST para cada tiempo de intermitencia de 24, 12, 6 y 4 horas, teniendo una mejor eficiencia de reducción de contaminantes en el humedal vertical HV 1 para un tiempo de intermitencia de 6 horas, las eficiencias de reducción que se encontraron fueron de 96.23%, 90.63% y 87.18% para los parámetros de DBO₅, DQO y SST respectivamente; asimismo, durante la realización de la investigación se presentaron inconvenientes de colmatación del medio granular, la cual origino volver a reiniciar la investigación, todo a consecuencia de la altura de arena gruesa empleada en el medio granular.

Asimismo, en el año 2019, García et al., se evaluó el comportamiento y la capacidad de reducción de los contaminantes del agua residual domesticas de dos tipos de plantas, se utilizaron dos especies de plantas que fueron *Phragmites Australis* y *Cyperus Papyrus* (familia del *Cyperus Alternifolius*) en cada humedal de flujo vertical de un medio granular compuesto por una combinación de diferentes sustratos de 0.40m arena y 0.25m de grava y evaluados para una carga hidráulica baja de 0.20 m³/m²xdía. El periodo de monitoreo tuvo una duración de tres meses; dando como resultado que el *Cyperus Papyrus* presentó una mayor reducción de contaminantes como 80.69%, 69.87%, 69.69% para los parámetros de DBO₅, DQO y NH₄⁺ respectivamente.

Por consiguiente; de las investigaciones mencionadas en los párrafos precedentes se ha realizado el siguiente cuadro resumen, donde se muestra

la variación de la composición del medio granular de los humedales evaluados y su influencia en la eficiencia de reducción de la DBO₅.

Tabla 1-1 Resumen de composición de medio granular de las investigaciones

INVESTIGACIONES	HUMEDAL	VEGETAL	CH m ³ /m ² xdía	COMPOSICIÓN MEDIO GRANULAR			ALTURA	% DBO ₅
				H1 = Arena	H2 = Grava fina	H3 = Grava media	H	
BOHORQUES (2015)	H1 y H3	H. Psittacorum	0.15	0.80			0.80	96.65%
	H5 y H7	H. Psittacorum	0.15		0.80		0.80	46.95%
GOMEZ LORDAN (2017)	H1	Cyperus Alternifolius	0.164	0.60	0.20		0.80	98.60%
	H2	Chrysopogon Zizanioides	0.164	0.60	0.20		0.80	96.40%
TORBISCO (2017)	HV1	Chrysopogon Zizanioides	0.577	0.50	0.15	0.15	0.80	96.23%
GARCIA (2019)	H1	Phragmites Australis	0.2	0.40	0.15	0.10	0.65	75.39%
	H2	Cyperus Papyrus	0.2	0.40	0.15	0.10	0.65	80.69%

De los resultados obtenidos de las investigaciones; se puede apreciar que los humedales verticales con medio granular heterogénea, teniendo como principal sustrato a la arena gruesa, permiten obtener eficiencias de reducción de la DBO₅ en rangos de 96-98%; obteniendo valores similares a los humedales verticales compuestos solo de arena gruesa, pero con la ventaja que los humedales verticales con medio granular heterogéneo pueden operar a mayor caudal y/o tiempo de alimentación debido a que difícilmente presentaran colmatación del medio granular.

Por otro lado, la investigación realizada por Gómez Lordan y García lleva a concluir que una planta de la familia Cyperus, en especial el Cyperus Alternifolius presenta mejores rendimientos de reducción de la DBO₅, llegando a una eficiencia de reducción de la DBO₅ superiores al 95%.

En ese sentido; resulta necesario e importante estudiar el efecto que presenta la composición del medio granular heterogéneo en la reducción de la DBO₅, en función a la altura del sustrato fino como arena gruesa que puede conformar el medio granular.

1.2. Planteamiento de la realidad problemática

1.2.1. Identificación del problema

En el Perú actualmente las plantas de tratamiento de aguas residuales están comprendidas en su mayoría por tecnologías convencionales tales como lagunas facultativas, lagunas anaerobias, lagunas aireadas y lodos activados; estos tipos de tecnologías requieren altos costos para inversión y operación y mantenimiento, es por ello que su desarrollo e implementación se ve limitado solamente para las zonas urbanas de nuestro país en vías de desarrollo; quedando así el sector rural con una baja cobertura de saneamiento.

Los diferentes sistemas de tratamiento secundario como lodos activados generan una producción considerable de lodos; las lagunas aireadas y lagunas facultativas ocupan grandes extensiones de terreno; asimismo, los lodos activados y las lagunas aireadas requieren de personal calificado para su operación y mantenimiento y requieren grandes cantidades de energía, lo antes mencionados resultan un problema en la actualidad y más aún para ciudades urbanas pequeñas y rurales.

La gran mayoría de las PTAR existentes cuentan con limitaciones para poder cumplir con la exigencia normativa de calidad de agua tratada para ser vertidos a un cuerpo receptor, en algunos casos se implementan unidades de tratamiento terciario o por último se realiza una descarga directa al cuerpo receptor generando la contaminación de estos.

A raíz del origen de estos problemas que presentan las PTAR, en el país se viene realizando distintas investigaciones entre ellas, los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical como un sistema de tratamiento secundario que optimiza el área de terreno requerida, los costos de operación y mantenimiento del sistema y asimismo permite cumplir los LMP y ECAs que la normativa vigente exige.

En tal medida aún quedan muchos vacíos para poder estandarizar los parámetros de diseño de los humedales artificiales de flujo vertical en el Perú, siendo uno de ellos la carga hidráulica adecuada a la que deben

funcionar, la composición y espesor de los sustratos que comprenden el medio granular y el efecto de las plantas emergentes en los humedales artificial de flujo subsuperficial vertical.

1.2.2. Formulación de la realidad problemática

¿Cuáles son los efectos de la composición del medio granular en la eficiencia de reducción materia orgánica y nutriente en un humedal artificial sub- superficial de flujo vertical?

1.3. Justificación e importancia

En las últimas dos décadas ha tomado importancia la aplicación de los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical como una alternativa solución a la clásica configuración de humedales de flujo subsuperficial horizontal, debido a que presentan una mayor capacidad de tratamiento en especial para la reducción de nitrógeno (Bohórquez Bedoya, 2015).

Varios estudios indican que esta tecnología presenta costos relativamente bajos de mantenimiento y la estabilidad de operación, no generan lodos ni olores no atraen mosquitos y pueden tolerar sobrecargas hidráulicas; cabe mencionar que dentro de sus beneficios principales está la disminución de la concentración de nutrientes en el efluente de una PTAR, evitándose así la eutrofización de los cuerpos receptores de los efluentes de esta.

En ese sentido es conveniente seguir estudiando a los humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo vertical para utilizarlos en el nuevo prototipo de las plantas de tratamientos de aguas residuales a fin de cumplir con las exigencias de la legislación peruana en cuanto a normativas de saneamiento vigentes que corresponden a la clasificación de cuerpos de agua y los estándares de calidad de agua respectivamente.

En continuación a las investigaciones realizadas en el centro de investigación de tratamiento de aguas residuales (CITRAR-FIA-UNI), Universidad Agraria de La Molina y en diferentes países de Sudamérica, que desarrollaron como tratamiento secundario de aguas residuales con humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical; se propone determinar la eficiencia de

reducción de materia orgánica y nutrientes en dos humedales subsuperficiales de flujo vertical en función de la carga hidráulica y la composición del medio granular, los cuales serán sembrados con la especie del *Cyperus alternifolius*, que operan bajo un flujo intermitente con periodo de alimentación de 6 horas y 6 horas de descanso; teniendo como afluente al sistema, el agua residual proveniente del tratamiento primario del CITRAR-FIA-UNI.

Los resultados obtenidos nos servirán para retribuir en la estandarización de los parámetros de diseño, operación y mantenimiento; además, de ser base para futuros trabajos de investigación, donde el objetivo sea buscar la eficiencia de reducción de contaminantes, la simplicidad de construcción y operación, y, que garantice un efluente que cumpla con las normas ambientales exigidas en el Perú.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar los efectos de la carga hidráulica y la composición del medio granular en un humedal sub-superficial de flujo vertical en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

1.4.2. Objetivos Específicos

- ❖ Evaluar la variación de la Temperatura Ambiental, Temperatura del Agua Residual, pH, Oxígeno Disuelto, Turbiedad, Conductividad y Humedad relativa en el agua residual, para diferentes cargas hidráulicas evaluadas en cada humedal artificial de flujo vertical.
- ❖ Determinar la eficiencia de reducción de la DBO₅, DQO, SST, NH₄⁺, NO₂⁻, NT, CT, PT y HT en el agua residual, evaluado para diferentes cargas hidráulicas en cada humedal artificial de flujo vertical.
- ❖ Comparar las eficiencias de reducción de los parámetros evaluados de ambos humedales artificiales de flujo vertical para cada carga hidráulica evaluada.

- ❖ Determinar la configuración óptima de carga hidráulica – composición y espesor de los sustratos que comprenden el medio granular para la implementación de los humedales de flujo vertical a escala real.
- ❖ Evaluar el crecimiento del *Cyperus Alternifolius* en los humedales artificiales de flujo vertical para las distintas cargas hidráulicas evaluadas y composición del medio granular.

1.5. Hipótesis

- ❖ Será posible determinar que el humedal H-2 plantado con el *Cyperus alternifolius* con un medio granular heterogéneo de 0.75m de altura, con una altura del sustrato de arena gruesa de 0.40m; es más eficiente en la reducción de la DBO_5 , que el humedal H-1 que también está plantado con el *Cyperus alternifolius* y un medio granular heterogéneo de 0.75m de altura, con una altura del sustrato de arena gruesa de 0.20m.

1.6. Variables del estudio

1.6.1. Variables Independientes

- ❖ Calidad del agua residual del afluente
- ❖ Carga Hidráulica aplicada a los humedales H-1 y H-2
- ❖ Composición del Medio filtrante de los humedales H-1 y H-2
- ❖ Tiempo de retención hidráulica

1.6.2. Variables Dependientes

- ❖ Eficiencia de Reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- ❖ Eficiencia de Reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)
- ❖ Eficiencia de Reducción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- ❖ Concentración en el efluente de Nitrógeno total (NT)
- ❖ Eficiencia de Reducción del Nitrógeno amoniacal (NH_4^+)
- ❖ Eficiencia de Reducción de Nitritos (NO_2^-)
- ❖ Concentración en el efluente de Nitratos (NO_3^-)
- ❖ Eficiencia de Reducción de Fosforo Total (PT)
- ❖ Eficiencia de Reducción de Hierro Total (HT)

- ❖ Eficiencia de Reducción de Coliformes Termotolerantes (CT)
- ❖ Crecimiento de Vegetales

1.6.3. Variables Intervinientes

- ❖ Condiciones climatológicas como temperatura del ambiente, temperatura del agua y humedad relativa.
- ❖ pH del afluente
- ❖ Turbiedad del afluente
- ❖ Conductividad del afluente
- ❖ Oxígeno disuelto del afluente

2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y LEGAL

2.7. Marco Teórico

2.7.1. Humedales Artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, contruidos por el hombre, inspirados en la capacidad de los humedales naturales para mejorar la calidad del agua a través de la reducción de contaminantes (Bohórquez Bedoya, 2015). Los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua residual, medio granular, los microorganismos, vegetación (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada de manera progresiva. (Delgadillo et al., 2010).

En la Figura 2-1 se muestra la clasificación de los humedales artificiales según la circulación y dirección del flujo.

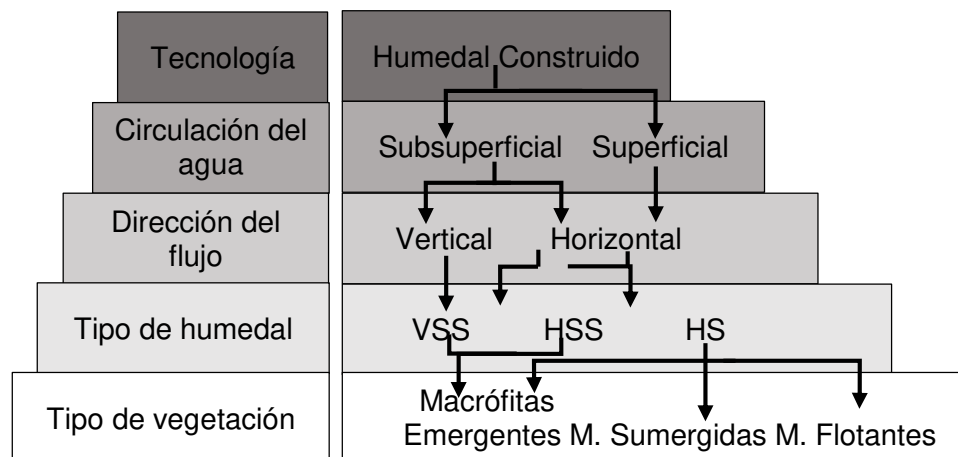


Figura 2-1 Clasificación de los humedales artificiales (Morales et al., 2013)
(Kadlec & Wallace, 2009)

HS: Humedal superficial, HSS: Humedal de flujo subsuperficial horizontal, VSS: Humedal de flujo subsuperficial vertical.

2.7.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical

Este tipo de humedales tuvieron su origen en Europa y fueron desarrollados como una mejora de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con la finalidad de mejorar la eficiencia de reducción de contaminantes.

El agua residual es suministrada al humedal de manera intermitente a través de pulsos (flujo discontinuo) de tal manera que el medio granular no permanezca constantemente inundado, favoreciendo la transferencia de oxígeno hacia los espacios intersticiales del medio granular originándose condiciones más oxidadas que los humedales del tipo horizontal (García & Corzo, 2008).

La carga orgánica superficial a la que pueden trabajar este tipo de humedales esta entre 20 – 40 g DBO/m²xdía (García & Corzo, 2008), mientras que Hoffmann et al., 2011, recomienda para climas cálidos una carga orgánica superficial entre 30 – 35 g DBO/m²xdía.

Los sistemas verticales generalmente trabajan en dos o más etapas en serie, combinándose dos humedales del tipo vertical o un humedal vertical seguido de otro humedal del tipo horizontal, siendo esta última combinación denominada sistema híbrido; García & Corzo, 2008 menciona que un sistema híbrido te logra reducir un 90% de la materia en suspensión, materia orgánica y nitrógeno, la reducción del nitrógeno es casi completa debido a que desarrollan los procesos de nitrificación y desnitrificación.

Un problema frecuente en los humedales del tipo vertical es la colmatación del medio granular debido a que trabajan con cargas orgánicas superficiales altas, por ello para evitar la colmatación del medio granular es preferible que el flujo de ingreso de agua residual al humedal sea discontinuo, es decir se debe proveer que el humedal tenga periodos de descanso, por ello es recomendable proyectar dos humedales en paralelo para poder alternar su funcionamiento.

El sistema de distribución del afluente estará constituido por tuberías perforadas distribuidas de manera lineal a lo largo del medio granular,

favoreciendo así una distribución homogénea en toda la superficie del medio granular; los sistema de recolección del efluente consiste en una red de tuberías distribuidas en el fondo del humedal, a estas tuberías generalmente se les conecta tuberías verticales que sobresalen del medio granular con el único fin de ventilar las partes más profundas del medio granular.

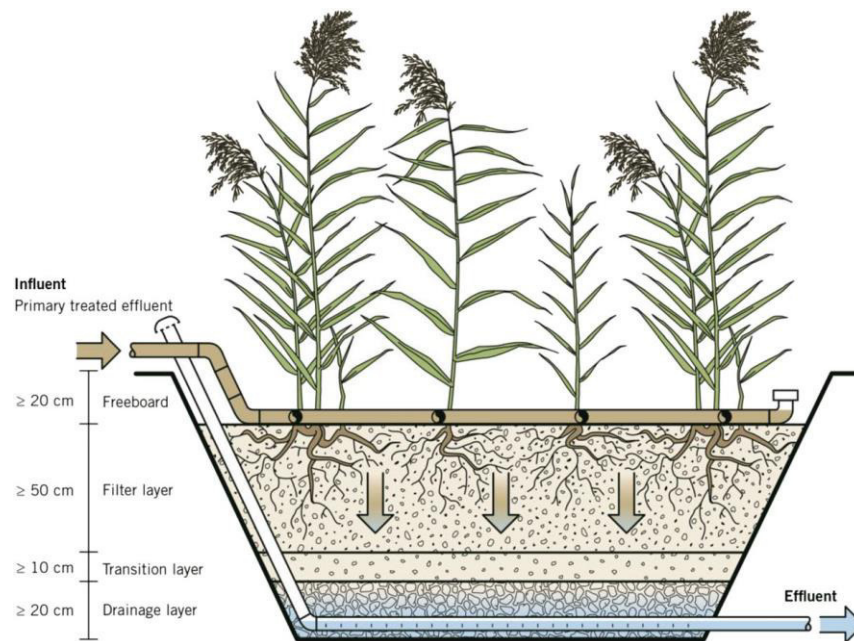


Figura 2-2 Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (Gunter et al, 2017)

2.7.2.1. Vegetación

Este tipo de vegetación cuentan con espacios vacíos que permiten la transferencia de oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio granular donde se hayan las raíces. (García Serrano & Corzo Hernández, 2008), este oxígeno transferido origina zonas aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación; denominados también con el nombre de macrófitas (Arias Triguero, 2004).

Según (García Serrano & Corzo Hernández, 2008) y (Lara Borrero & Salgot, 1999) las macrófitas contribuyen al tratamiento de las aguas residuales tales como:

- ❖ Estabilizando al medio granular y limitando la canalización del flujo.
- ❖ La presencia de las macrófitas da lugar que el agua residual fluya a velocidades bajas, permitiendo así que la materia orgánica suspendida se deposite en el medio granular, raíces y fondo de humedal.
- ❖ Su presencia da a lugar a que el agua residual fluya a velocidades bajas, permitiendo así que los materiales suspendidos se depositen.
- ❖ Las raíces y rizomas aportan un área superficial para el crecimiento de la biopelícula.
- ❖ Las macrófitas contribuyen a la eliminación de nutrientes mediante su asimilación para su crecimiento.
- ❖ Las macrófitas reducen la intensidad de la luz evitando así grandes variaciones de temperatura en las profundidades que puedan afectar el proceso de depuración.

Como se mencionó en los párrafos precedentes, sobre la importancia y contribución de las plantas en la reducción de contaminantes, por lo que es indispensable realizar una buena elección de las macrófitas, Hoffmann et al., 2011, recomienda lo siguiente:

- ❖ Usar especies locales, autóctonas y no importaciones exóticas o especies invasoras.
- ❖ Usar especies de plantas que crecen naturalmente en los humedales o riberas de los ríos debido a que sus raíces ya están adaptadas a crecer en condiciones de agua saturada.
- ❖ Son preferibles las plantas con raíces extensas y un sistema de reproducción a través rizomas subterráneos.

- **Cyperus alternifolius**

Es una planta herbácea rizomatosa, con hojas reducidas a vainas, originario de Madagascar, introducida y adaptada a muchas zonas tropicales y subtropicales del mundo, tales como Perú.

También llamado como “paragüitas”, es una hierba perenne, que crece rápidamente en zonas húmedas con un fuerte sistema de raíces, teniendo una productividad alta. Alcanza un tamaño de 50-150cm de altura, rizomas de tamaño medio y un tallo de 4-7mm de diámetro (Gómez Lordan, 2017).

De acuerdo con Gómez, 2017 el *Cyperus alternifolius* presenta las siguientes características:

- ❖ Aguanta muchas horas expuestas al sol y altas temperaturas.
- ❖ Su crecimiento vegetativo se puede paralizar si se expone a temperaturas por debajo de 10 °C, por ello se recomienda protegerlo en invierno.
- ❖ Soporta salinidades moderadas del agua, independiente del sustrato.
- ❖ Sistema radicular fuerte y denso, lo cual brinda estabilidad al medio granular permitiendo que se pueda desarrollar procesos microbiológicos en su zona radicular.

Tabla 2-1 La taxonomía del vegetal *Cyperus alternifolius* (Sanz, Dana, & Sobrino, 2004)

Reino	Plantae
Familia	Cyperaceae
Género	<i>Cyperus</i>
Nombre científico	<i>Cyperus alternifolius</i>
Nombre común	Paraguitas, papiro paragüitas
Origen	Madagascar

El cultivo puede darse a través de la multiplicación de las semillas o división de la planta o de corte; la primera comprende en utilizar de 3-5 divisiones para la siembra como un solo grupo, lo más adecuado

para la multiplicación a través de semillas es realizarlo en la primavera. La multiplicación por división de planta o de corte consiste en extraer de la planta un tallo de 10-20cm de longitud, la cual será sumergida en agua (Gómez Lordan, 2017).



Figura 2-3 *Cyperus Alternifolius* en un humedal vertical

En el 2003 Miglio & Espinoza, evaluaron la capacidad depuradora de dos plantas (carrizo y cyperus) comparadas con un sistema en blanco (sin plantas). Cada uno de los sistemas estuvo formado por dos pantanos colocados en serie; el primero de flujo vertical descendente y el segundo de flujo vertical ascendente. El estudio concluyó que al haberse logrado más de un 90% de eficiencia en la reducción de DQO y nitrógeno total, se puede afirmar que el sistema funcionó satisfactoriamente. Obteniéndose mejores resultados en el sistema con el cultivo de cyperus.

(Yao, 2011), demostró en un estudio que existían diferencias significativas de liberación de oxígeno de las raíces de las plantas en humedales que han sido evaluados, y el proceso bioquímico de la raíz fue la principal fuente de liberación de oxígeno; en la que la liberación de oxígeno de las raíces del *Chrysopogon zizanioides* y *Cyperus alternifolius* fueron de 74-77% y 71-72%, respectivamente.

Se sugirió que el potencial de liberación de oxígeno de la raíz podría ser utilizado como un parámetro para seleccionar plantas de humedales que pueden aumentar el suministro de oxígeno al medio granular de humedales construidos.

(Pérez, 2012), realizó una investigación de un humedal subsuperficial vertical sembrado con *Cyperus alternifolius*, después de las evaluaciones realizadas de los parámetros DQO, DBO₅, PT, Nitrógeno Kjeldahl y SST se obtuvieron las siguientes eficiencias de reducción de 89.8%, 84.9%, 76.5%, 82.7% y 98.1% respectivamente.

(Gómez Lordan, 2017), evaluó diversos parámetros de las aguas servidas para ver el comportamiento y la potencialidad fitodepuradora de dos tipos de plantas; consistió en dos humedales artificiales verticales sembrados con *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides*, se alcanzaron eficiencias de reducción de 98.6 y 96.4% de DBO₅, 93 y 90% de DQO, 89.2 y 87.2% en SST y 4 y 5 unidades logarítmicas/100 ml de coliformes termotolerantes o fecales para los humedales con Paragüitas y Vetiver en ese orden.

2.7.2.2. Medio Granular

El medio granular de un humedal artificial de flujo subsuperficial puede estar formado por arena gruesa, grava, roca y/o plástico; este medio debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él, sirven como soporte para el crecimiento de las macrófitas y brindan área superficial para el desarrollo de la biopelícula, las cuales realizan la actividad biodegradadora (Delgadillo et al., 2010).

Una variedad de transformaciones químicas y biológicas tienen lugar dentro del medio granular; a la vez retienen a través de sus espacios vacíos a muchos contaminantes por el fenómeno de filtración o sedimentación (Lara Borrero & Salgot, 1999).

Asimismo, el medio granular para los sistemas verticales debe ser limpio, duro, durable y capaz de mantener su forma en el tiempo, está

conformado por un medio del tipo heterogéneo, es decir por tres capas horizontales de diferente granulometría, la cual irá aumentando con la profundidad; para un tratamiento secundario de las aguas residuales García & Corzo, 2008 recomienda una distribución del medio granular de la siguiente manera:

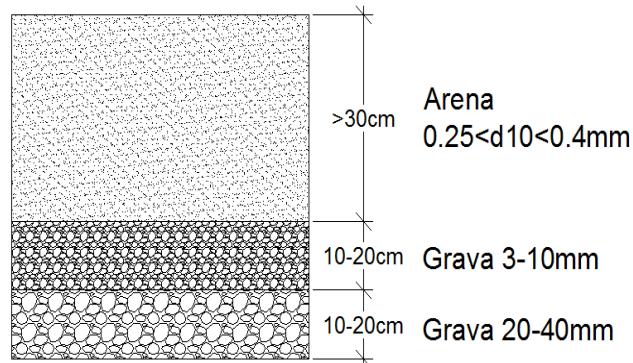


Figura 2-4 Distribución del medio granular para un tratamiento secundario

Bohórquez Bedoya, 2015, evaluó el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas, una de sus variables fue el tipo de sustrato utilizado (arena o grava), encontrándose una mayor eficiencia de reducción de materia orgánica, nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos totales para los humedales que tuvieron como medio granular la arena.

2.7.3. Reducción de los contaminantes en humedales artificiales

Según (Hoffmann et al., 2011) Los humedales artificiales de flujo subsuperficial son capaces de reducir los siguientes contaminantes:

- ❖ Sólidos suspendidos totales (SST)
- ❖ Materia orgánica (medida como Demanda Bioquímica o Demanda Química de Oxígeno)
- ❖ Nutrientes (nitrógeno y fósforo)
- ❖ Patógenos, metales pesados y otros contaminantes

2.7.3.1. Materia en Suspensión

La materia en suspensión queda retenida en el medio granular de los humedales artificiales subsuperficiales debido a los procesos de filtración, sedimentación y adherencia. Entre estos fenómenos destaca la sedimentación debido a la baja velocidad de circulación del agua y al tamizado que se origina a través de los espacios vacíos del medio granular; asimismo la adherencia entre las partículas promueve la formación de partículas de mayor tamaño, pudiendo así quedar retenida en el medio granular (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Según (García & Corzo, 2008) la reducción de la materia en suspensión ocurre en los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical a los $1/4 - 1/3$ de la profundidad del medio granular medido desde la superficie del mismo; normalmente tienen una eficiencia de reducción del 90%.

En los humedales se pueden producir materia en suspensión debido a la descomposición de las raíces y rizomas de las macrófitas, muerte de los microorganismos existentes en el medio granular y a la descomposición de la materia orgánica depositada en la superficie del medio granular (hojas y tallos de los macrófitas) (Arias Triguero, 2004).

2.7.3.2. Materia Orgánica

La reducción de la materia orgánica que se realiza en los humedales artificiales subsuperficiales es compleja siendo el resultado de la interacción de múltiples procesos físicos, químicos y bióticos que suceden de manera simultánea dentro del medio granular.

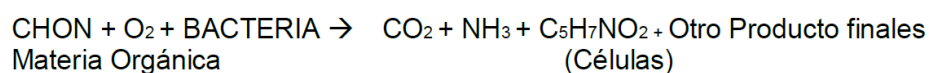
La materia orgánica está dividida en particulada y disuelta; en humedales verticales la M.O. particulada queda retenida cerca de la superficie, gran parte de esta materia está comprendida en la materia en suspensión (Morales et al, 2013).

Según (García & Corzo, 2008), la materia orgánica puede ser degradada por vías aeróbicas y anaeróbicas, mediante el uso de

microorganismos principalmente las bacterias. A través de los medios aerobios la materia orgánica particulada se convierte mediante la fragmentación abiótica en partículas más simples que pueden ser hidrolizadas por enzimas; las enzimas son excretadas por bacterias heterotróficas aeróbicas y fermentativas facultativas, como resultado de la hidrólisis se forman sustratos como la glucosa o aminoácidos, las cuales son asimilados por las bacterias heterotróficas aeróbicas o fermentativas facultativas, estos también pueden ser asimilados por bacterias sulfaredutoras, metanogénicas. Los sustratos simples presentes en el agua residual son asimilados directamente sin necesidad de hidrólisis previa.

Por otro lado (García & Corzo, 2008), también menciona que en ausencia del oxígeno disuelto las bacterias fermentativas facultativas se desarrollan originando ácidos grasos como el acético y el láctico, alcoholes como el etanol y gases como el H₂, estos compuestos originados sirven como sustratos para las bacterias sulfaredutoras y metanogénicas, siendo estas dos del tipo anaerobio. Ante la presencia de estas bacterias anaeróbicas y en presencia de sulfato y alta concentración de materia orgánica las bacterias sulfaredutoras pueden desarrollarse de una manera rápida compitiendo así con las bacterias aeróbicas por el sustrato, disminuyendo así la eficiencia de reducción de materia orgánica.

Asimismo (Metcalf & Eddy, 1995), señalan que la estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo a través del uso de los microorganismos, principalmente las bacterias, estos microorganismos en procesos aerobios oxidan la materia orgánica carbonosa coloidal y disuelta y lo convierten en productos más sencillos como gases y tejido celular; en la siguiente ecuación estequiometría se muestra la oxidación y síntesis de la materia orgánica.



Se sabe que en los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal el oxígeno disuelto se encuentra muy limitado predominando así la degradación anaeróbica es por ello que son menos eficientes en la reducción de materia orgánica frente a los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical, donde predomina la degradación aeróbica.

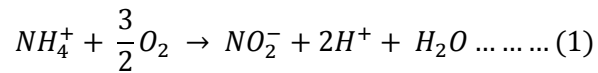
De igual manera (García & Corzo, 2008) indica que se puede alcanzar eficiencias de reducción de materia orgánica que oscilen entre 75-95% para los humedales verticales.

2.7.3.3. Nitrógeno

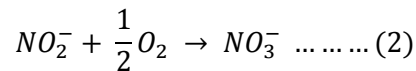
Los mecanismos de eliminación del nitrógeno dependen de la forma en que se encuentre presente en el agua residual, estas pueden ser como nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) (Morales et al., 2013). En las aguas residuales domesticas el nitrógeno se encuentra fundamentalmente en forma del nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico; raras veces presenta concentraciones altas de nitritos y nitratos (García & Corzo, 2008).

En los humedales artificiales de flujo subsufuperficial el principal mecanismo de reducción de nitrógeno es del tipo microbiano mediante la nitrificación seguida de la desnitrificación, también podemos encontrar otros procesos como adsorción del amonio, asimilación de las plantas, volatilización del amonio, procesos Anammox (Anaerobic ammonium oxidation) y la mineralización del nitrógeno orgánico (Vymazal, 2007).

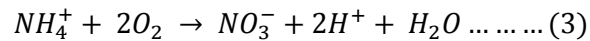
La nitrificación es un proceso microbiano que se desarrolla en dos fases, la primera es la nitritación que es la oxidación del ion amonio a nitrito realizadas por las bacterias quimioautótrofas aeróbicas (Rodríguez et al., 2012) tales como las nitrosomonas, este tipo de bacterias tienen como fuente de carbono al dióxido de carbono y su fuente de energía proveniente de las reacciones oxidación-reducción (Vymazal, 2007), mediante la siguiente ecuación estequiométrica puede resumirse la nitritación:



La segunda fase es la nitratación y es la oxidación del nitrito a nitrato realizado de igual manera por las bacterias quimioautótrofas aeróbicas del género nitrobacter, mediante la siguiente ecuación estequiometrica puede resumirse la nitratación:



Sumando ambas ecuaciones (1) y (2) el proceso de nitrificación quedaría resumida por:

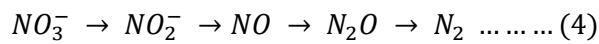


Según la ecuación 3 el proceso de nitrificación produce iones H⁺, lo cual provoca que se disminuya el pH de los efluentes, también se necesita un gran consumo de oxígeno disuelto y alcalinidad, por ello este proceso es limitado para las zonas aeróbicas.

Según (García & Corzo, 2008) se necesita 4.6 mg de oxígeno por cada miligramo de amonio oxidado, (Vymazal, 2007) sugiere que se consume de alcalinidad HCO₃⁻ 8.64 mg por cada miligramo de nitrógeno amoniacal oxidado, también recomienda un rango de pH y temperatura que favorece la nitrificación 6.6 – 8.0 y 25 – 35 °C respectivamente. Con ello se puede concluir que la nitrificación se ve influenciado directamente a la temperatura, valor de pH, la alcalinidad del agua, la fuente de Carbono inorgánico, la población microbiana, y las concentraciones de amonio-N y oxígeno disuelto.

La desnitrificación es un proceso microbiano donde el nitrato formado en la nitrificación se transforma en dinitrógeno (N₂) a través de intermedios como nitrito, óxido nítrico y óxido nitroso (Vymazal, 2007), este proceso es realizado por las bacterias heterotróficas, estas bacterias son aquellas que tienen como fuente de carbono a la materia orgánica (Delgadillo et al., 2010), este proceso requiere de condiciones anóxicas, una adecuada fuente de carbono y condiciones adecuadas

de temperatura (García & Corzo, 2008), el proceso de desnitrificación queda resumida por la siguiente ecuación:



Este proceso de desnitrificación se ve influenciado por la baja concentración O_2 , potencial redox, la temperatura, valor de pH, la presencia de bacterias desnitrificantes, la materia orgánica, la concentración de nitrato (Vymazal, 2007).

Según (Cárdenas & Sánchez, 2013) el impacto de la concentración del oxígeno disuelto se vuelve mas significativo a medida que aumenta la carga orgánica en los reactores; puesto que se favore un crecimiento de las bacterias heterótrofas que compitaran con las autótrofas o nitrificantes por el limitado oxígeno disponible.

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical se obtienen muy buenos resultados para la eliminación del nitrógeno amoniacal convertido a nitrato (nitrificación) debido a que predominan las zonas aerobias en casi todo el medio granular, por ende, el proceso de desnitrificación se ve limitado por las concentraciones altas de oxígeno disuelto (García & Corzo, 2008).

El nitrógeno orgánico que entra al humedal artificial subsuperficial está normalmente asociado con la materia particulada como los sólidos orgánicos del agua residual y/o algas, la reducción inicial de estos compuestos es a través de la filtración para luego sufrir una descomposición o mineralización formándose así nitrógeno amoniacal (Lara Borrero & Salgot, 1999). La mineralización es en función a la relación de carbono/nitrógeno, de las enzimas extracelulares, la biomasa microbiana y las condiciones redox del medio. Se puede producir tanto en vía aerobia o anaerobia (Arias Triguero, 2004).

Las macrófitas pueden asimilar nitrógeno en sus formas de amonio o nitrato, siendo preferentemente asimiladas el amonio, el nitrógeno asimilado es reducido del agua residual incorporándose a la biomasa de las macrófitas, se recomienda podar las partes aéreas de la

vegetación antes de la senescencia anual y así evitar el retorno del nitrógeno asimilado al agua residual; a través de este proceso se puede remover entre 10-20% del nitrógeno (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

2.7.3.4. Fosforo

Los mecanismos de reducción de fósforo pueden ser de forma biótica y abiótica; dentro de los mecanismos bióticos se considera la asimilación por parte de las macrófitas y los microorganismos para su desarrollo; los mecanismos abióticos comprenden la adsorción por el medio granular (García & Corzo, 2008).

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial el porcentaje de eliminación de fósforo suele estar entre 10-20%; no obstante se ha podido observar a través de varios estudios que después de la puesta en marcha del sistema se pudo encontrar eficiencias mayores de reducción pero están disminuyen rápidamente con el tiempo, debido a que el medio granular va perdiendo su capacidad de adsorción y siendo así la necesidad de reemplazar el medio granular para recuperar esta (García & Corzo, 2008).

2.7.3.5. Hierro Total

Los mecanismos de reducción de hierro en los humedales artificiales de flujo subsuperficial son similares a los del fósforo, tales como la asimilación por parte de las plantas, adsorción y precipitación (Lara Borrero & Salgot, 1999).

2.7.3.6. Patógenos

García & Corzo, 2008 menciona que los mecanismos de eliminación de patógenos es un proceso de gran complejidad donde intervienen la filtración, la adsorción y la depredación; la eficiencia de reducción depende del tiempo de permanencia y del medio granular; se dice que cuanto menor es el diámetro de los granos del medio granular, mayor es el porcentaje de eliminación de patógenos.

El grado de eliminación para ambos tipos de humedales artificiales de flujo subsuperficial oscila entre 1 y 2 unidades logarítmicas/100 ml aproximadamente.

2.7.4. Influencia de la carga hidráulica

La carga hidráulica queda definida según Kadlec & Knight al equivalente en lluvia del flujo que se está estudiando, no implica la distribución uniforme del agua sobre toda la superficie del humedal; resultando ser el cociente entre el caudal de entrada y el área superficial del humedal, en tal sentido su ecuación queda definido de la siguiente manera:

$$\text{Carga Hidráulica Superficial (CHS)} = \frac{\text{Caudal (m}^3/\text{día)}}{\text{Área (m}^2\text{)}}$$

La carga hidráulica y el tiempo de retención son muy importantes en los procesos de depuración de los humedales. A cargas hidráulicas bajas el tiempo de retención es elevado, mientras que a cargas hidráulicas altas el agua pasa rápidamente por el humedal, reduciendo así el tiempo de contacto entre el agua residual y los microorganismos del humedal encargados de los procesos de degradación (Ngo et al., 2010).

En general los humedales artificiales necesitan una carga hidráulica baja y un tiempo de retención elevado; por ende, para su implementación se requiere una superficie mayor para alcanzar los rendimientos esperados en la depuración de contaminantes.

Algunos estudios se han realizado respecto a la influencia de la carga hidráulica en la reducción de contaminantes; en el año 2005 García et al., encontró que las concentraciones de DQO a la salida de los humedales aumentan conforme la carga hidráulica iba incrementándose; Fountoulakis et al. en el año 2009, realizó ensayos donde se observó que la eliminación de DQO disminuyó en todos los sistemas estudiados para cargas hidráulicas superiores a la de diseño del humedal, también observaron que existe una relación lineal positiva entre la carga hidráulica y la concentración de DQO y sólidos suspendidos en el afluente del humedal; para el año 2012 Enrique de Ascoitia, realizó una investigación evaluando los efectos de las sobrecargas hidráulicas en la capacidad de tratamiento

de una planta experimental a escala que semeja un sistema híbrido conformado por un humedal de flujo subsuperficial vertical seguido de uno de flujo subsuperficial horizontal y por último uno de flujo superficial; de las evaluaciones realizadas se puede concluir que las sobrecargas hidráulicas no afecto significativamente en la eficiencia de reducción de contaminantes, teniendo las concentraciones de los parámetros en el efluente dentro de los valores limites exigidos por la normativa.

En el año 2012 los investigadores Rodríguez et al., estudiaron 2 humedales de flujo vertical, en un humedal se plantó la especie *Iris pseudacorus* (HFV2) y el otro humedal sin plantar (HFV4). Se realizaron 3 fases experimentales donde se ensayó las distintas cargas hidráulicas de: 4.2, 8.3 y 16.6 cm/día (según el orden que fueron evaluadas en cada humedal); la eliminación de DQO se mantuvo casi-constante, independiente de la carga hidráulica y carga orgánica, la mejor eficiencia se obtuvo para la mínima carga hidráulica evaluada. En cuanto a la eficiencia de reducción de sólidos en suspensión fueron muy bajos para las dos primeras fases, la mayor eliminación se obtuvo para la máxima carga hidráulica evaluada.

2.8. Marco legal

- ❖ Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de PTAR aprobado mediante el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM publicado el 17 de Marzo del 2010.
- ❖ Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y disposiciones complementarias aprobados mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM publicado el 7 de Junio del 2017.
- ❖ Directrices Sanitarias de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la agricultura.
- ❖ Guías de OMS para el Uso Seguro de Aguas Residuales y Excreta (3rd Edición) publicado el 29 de enero del 2013.
- ❖ Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales aprobado mediante la Resolución Ministerial N° 273-2013-MVCS publicado el 24 de Octubre del 2013.

3. CAPÍTULO III METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se detallan los materiales, equipos y metodologías que fueron utilizados durante el proceso de implementación y el proceso de evaluación experimental del sistema.

3.1. Ubicación de la investigación

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos de la Universidad Nacional de Ingeniería (CITRAR-FIA-UNI), la cual se encuentra ubicada en la Av. Túpac Amaru S/N en el distrito del Rímac, departamento de Lima, Perú (Ver Fotografía N° 1).

También se debe mencionar que algunos análisis fisicoquímicos y biológicos fueron realizados en el Laboratorio de Tesistas de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería.

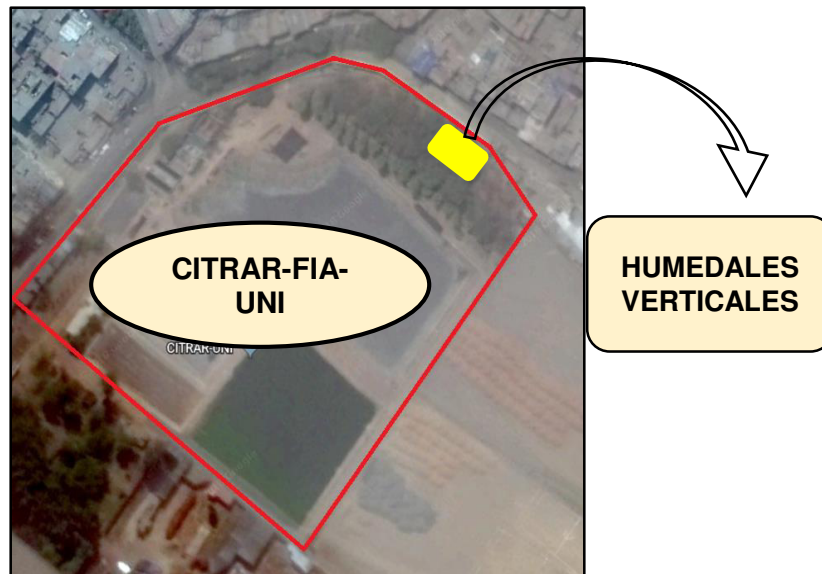


Figura 3-1 Ubicación de la investigación

3.2. Descripción de la metodología

3.2.1. Diseño experimental del sistema

El sistema de investigación se diseñó con el propósito de realizar un tratamiento secundario al efluente del Reactor Anaerobio de Manto de

Lodos y Flujo Ascendente (UASB) ubicado en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales del CITRAR-FIA-UNI.

El agua residual que es tratado en la PTAR piloto principal del CITRAR-FIA-UNI proviene de los Asentamientos Humanos El Ángel y El Milagro, cabe mencionar que el desagüe doméstico hace su ingreso a la PTAR a través de una captación para luego ser dirigido hacia el pre tratamiento, en el cual primero pasara por unas rejillas gruesas, luego por rejillas finas y finalmente por el desarenador; de ahí pasara hacia un sistema de tratamiento primario, en este caso por el Reactor Anaerobio de Manto de Lodos y Flujo Ascendente (UASB), del efluente de este último tratamiento obtendremos nuestro afluente hacia nuestro sistema de investigación, el cual es impulsado por un equipo de bombeo desde la zona de decantación del UASB hacia la unidad de almacenamiento del sistema de investigación.

El sistema de investigación estará conformado por un sistema de almacenamiento y distribución del caudal, un sistema de tratamiento secundario y el sistema de recolección del caudal; para la presente investigación nuestras unidades de experimentación se encuentran dentro del sistema de tratamiento secundario, para ello se han construido dos reactores de humedales verticales, cuyas dimensiones son 1.00m de lado con una sección transversal cuadrada, ambos humedales fueron plantados con macrófitas, con una altura del medio granular de 0.75m, siendo la única diferencia entre ambos el espesor de cada sustrato que componen el medio granular heterogéneo.

Con el fin de verificar las dimensiones obtenidas y los parámetros considerados para el diseño, véase el ANEXO Nº 2 – DISEÑO DEL HUMEDAL VERTICAL

Una vez concebido el diseño de los humedales verticales, se procedió a la implementación experimental del sistema, esta última comprendió desde el acondicionamiento del área otorgado en el CITRAR-FIA-UNI para la realización de la presente investigación, construcción del sistema, plantación de las macrófitas y pruebas hidráulicas. Seguidamente

detallaremos las diferentes actividades realizadas durante la implementación:

Trabajos preliminares: Comprendió la limpieza y el acondicionamiento del terreno donde se construyeron los humedales, a la vez en esta etapa se realizó la compra de materiales de construcción (arena gruesa, arena fina, cemento tipo I, ladrillos King Kong, piedra chancada de ½" y agua).

Obra Civil: Abarca la construcción de dos humedales, los cuales están conformados por una base de losa de concreto y muros de ladrillos, donde los muros interiores fueron impermeabilizadas, también se consideró una estructura metálica como soporte para instalar el tanque de almacenamiento y el envase de bombeo del afluente hacia el sistema.

Pruebas del sistema con agua limpia: Después de terminar las obras civiles se realizó una prueba de hidráulica con agua limpia, la cual consistía en llenar los humedales con agua limpia hasta una altura de 0.80m permaneciendo en ellas durante 3 días, con la finalidad de descartar futuras filtraciones en el sistema y el correcto funcionamiento de la impermeabilización.

Obra Sanitaria: Contempla a todas las instalaciones de tuberías y accesorios con el fin de distribuir el afluente sobre los humedales verticales construidos, también al sistema de recolección del efluente tratado y por último a sistema de ventilación de los humedales mencionados.

Trabajos Eléctricos: Comprendió con el cableado eléctrico y la instalación de interruptores termomagnéticos y temporizadores, con el fin de garantizar el funcionamiento intermitente del equipo de bombeo.

Acondicionamiento y llenado del medio granular a los humedales: El medio granular es del tipo heterogéneo, estuvo conformado por tres capas horizontales de diferentes sustratos y granulometría; en cada humedal se utilizó como sustratos arena gruesa, grava media considerado como confitillo y por ultimo una grava gruesa siendo la piedra chancada en este caso; todos los sustratos fueron comprados en distintas

ferreterías; por ello se tuvo que acondicionar cada sustrato antes de ser llenado al humedal; este acondicionamiento abarcó el tamizado de cada material por distintas mallas y el lavado del sustrato seleccionado; con el fin de sintetizar el trabajo realizado se muestra la siguiente Tabla 3-1:

Tabla 3-1 Equipos y herramientas utilizados para el proceso de evaluación experimental

Material seleccionado			
Sustratos	Malla	Retenido	Pasa
Arena Gruesa	Malla mosquitero	X	
Confitillo	Malla de 1/2"		X
	Malla de 1/4"	X	
Piedra Chancada	Malla de 3/4"	X	

La granulometría de cada sustrato fue elegida siguiendo las recomendaciones indicadas en el ítem 2.7.2.2 Medio Granular

En la Figura 3-2 y Figura 3-3 podemos observar la distribución de los sustratos en el medio granular del humedal H-1 y H-2

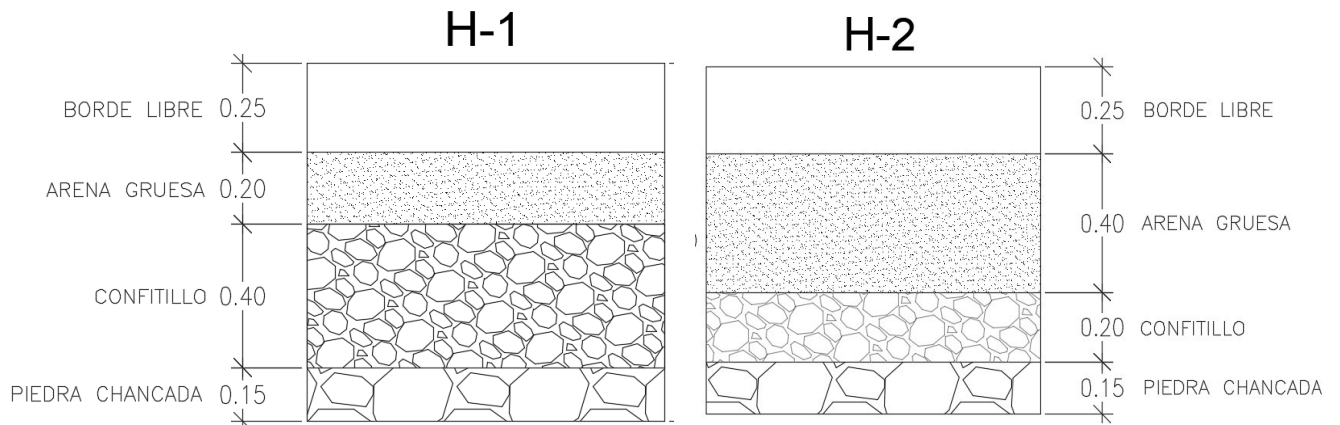


Figura 3-2 Distribución de los sustratos en el medio granular del Humedal H-1

Figura 3-3 Distribución de los sustratos en el medio granular del Humedal H-2

En la base de ambos humedales se colocó una capa de grava gruesa – piedra chancada de 0.15m de altura, la porosidad de este sustrato es de 48%.

En la parte intermedia de cada humedal se colocó una capa de grava media – confitillo; siendo para el humedal H-1 una altura de 0.40m y para el humedal H-2 una altura de 0.20m; la porosidad de este sustrato es de 44%; por último, en la parte superior de cada humedal se colocó una capa de arena gruesa; siendo para el humedal H-1 una altura de 0.20m y para el humedal H-2 una altura de 0.40m; la porosidad de este sustrato es de 38%.

Las porosidades consideradas para cada sustrato fueron halladas de manera experimental durante la implementación del sistema, para más detalle véase el

ANEXO N° 1 – POROSIDAD DE CADA SUSTRATO DEL MEDIO GRANULAR

Acondicionamiento del sistema con agua residual: Seguidamente de colocar el medio granular heterogéneo en cada humedal, se procede a acondicionar el medio granular con agua residual durante una semana con un periodo de intermitencia de cada 6 horas; con la finalidad de nutrir el medio granular y las macrófitas al ser plantadas puedan obtener los nutrientes necesarios para poder desarrollarse de manera adecuada.

Plantación de las macrófitas en los humedales construidos: Las macrófitas que se plantaron fue el *Cyperus Alternifolius*, los cuales fueron obtenidos de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales del Centro Modelo de Tratamiento de Residuos de la Universidad Agraria de la Molina (CEMTRAR – UNALM); las macrófitas una vez obtenidas fueron acondicionadas por una semana en un balde con agua residual provenientes de la laguna secundaria de la PTAR de CITRAR-FIA-UNI; Luego de ello se procedió a cortar las raíces a una altura de 0.10m y los tallos a una altura de 0.20m; las macrófitas fueron divididas en pequeños vegetales con una menor densidad de tallos, con la única finalidad de observar un mejor crecimiento de las mismas.

Para la presente investigación, a inicios del mes de setiembre se sembraron 9 vegetales en cada humedal.

Véase todos los trabajos realizados en la implementación del sistema en el ANEXO N° 5 – PANEL FOTOGRÁFICO

3.2.2. Cronograma de desarrollo

Para un mejor desarrollo del proceso de evaluación experimental del sistema, este será dividido en 5 etapas, que incluirá desde la puesta en marcha del sistema hasta la finalización de las etapas con las diferentes cargas hidráulicas a evaluar, en la Tabla 3-2 se detalla cada una de las etapas:

Tabla 3-2 Características hidráulicas de cada etapa del sistema

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	EVALUACIÓN	CARGA HIDRAÚLICA (m³/m²x12horas)	ALIMENTACIÓN-DESCANSO
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	Puesta En Marcha	0.2	6 horas
ETAPA 1	Carga Hidráulica N° 1	0.2	6 horas
ETAPA 2	Carga Hidráulica N° 2	0.3	6 horas
ETAPA 3	Carga Hidráulica N° 3	0.4	6 horas
ETAPA 4	Carga Hidráulica N° 4	0.6	6 horas

El desarrollo de la evaluación experimental fue elaborado bajo la supervisión del Asesor de la presente investigación, teniendo una duración de 32 semanas, su fecha de inicio fue el 09 de setiembre del 2016 y culminando el 28 de abril del 2017, con las etapas mencionadas en la Tabla 3-2 se desarrolló el siguiente cronograma que se indica en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Desarrollo y duración de cada etapa del sistema*

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	SEMANA N°	FECHA DE INICIO	FECHA DE TERMINO	DURACIÓN (SEMANAS)
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	1-16	09/09/2016	30/12/2016	16
ETAPA 1	17-20	02/01/2017	31/01/2017	4
ETAPA 2	21-24	01/02/2017	01/03/2017	4
ETAPA 3	25-28	02/03/2017	05/04/2017	4
ETAPA 4	29-32	06/04/2017	28/04/2017	4

*El proceso de evaluación experimental fue desarrollado bajo la supervisión del Asesor de Tesis de la presente investigación.

3.2.3. Unidades experimentales

Las unidades experimentales implementadas en el sistema de investigación estarán comprendidas por: un tanque de almacenamiento de Agua Residual de 1100 litros de capacidad, un envase de bombeo para la alimentación de agua residual hacia los humedales, 02 humedales contruidos de flujo vertical (H-1 y H-2) ambos serán plantados con la macrófita *Cyperus Alternifolius*, ambos tienen una profundidad del medio granular de 0.75m, la única diferencia entre ambos son los espesores de cada sustrato que compone el medio granular.

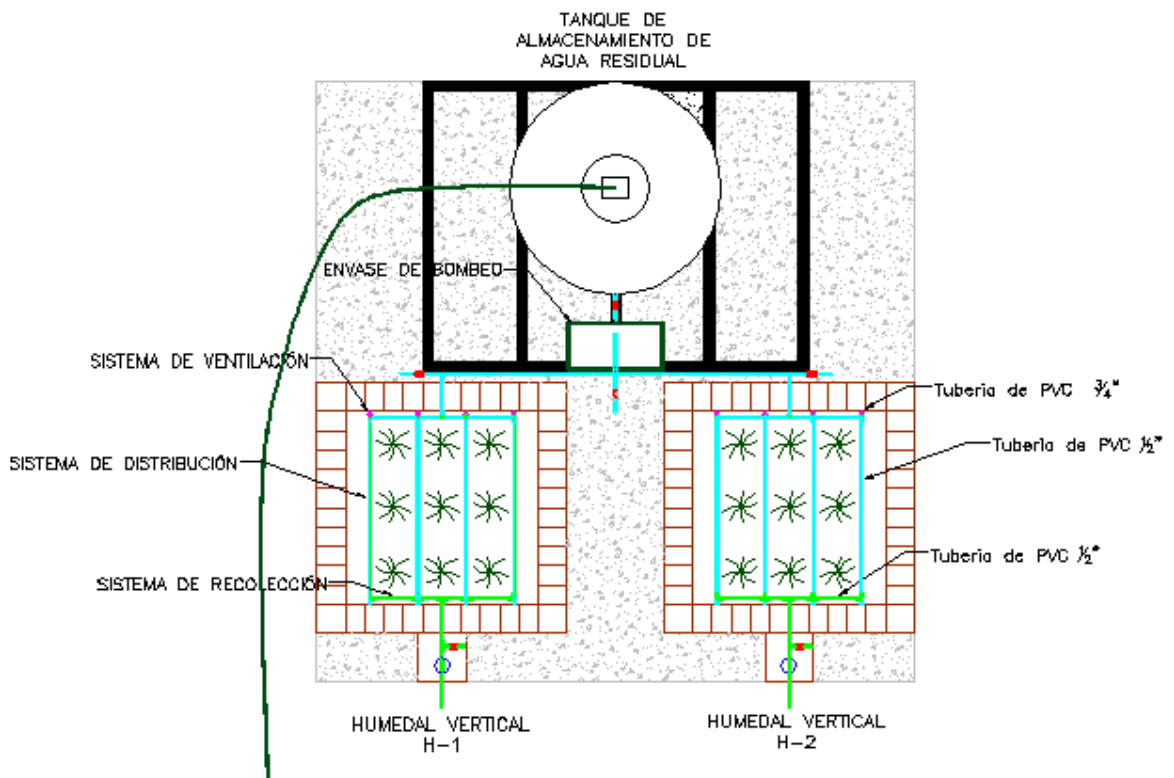


Figura 3-4 Esquema de la investigación

El funcionamiento de la presente investigación inicia desde un tanque de almacenamiento del agua residual, luego con el uso de una bomba sumergible, ubicada en el envase de bombeo, se alimenta a los humedales con un flujo discontinuo que varía cada 6 horas, es decir 6 horas de

bombeo con flujo continuo seguido de 6 horas de descanso y así sucesivamente; el encendido y apagado del equipo de bombeo fue programado en un temporizador ubicado en el tablero general.

El caudal ingresado en cada etapa de evaluación hacia cada humedal es distinto y será controlado mediante una válvula de paso general de ½"; con ello garantizamos que cada humedal será suministrado con agua residual al mismo tiempo y en iguales condiciones para cada carga hidráulica a evaluar; las características de funcionamiento de cada etapa de evaluación se indican en la siguiente Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Características de funcionamiento de cada etapa de evaluación

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	EVALUACIÓN	CARGA HIDRÁULICA (m³/m²x12horas)	ALIMENTACIÓN-DESCANSO	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	Puesta En Marcha	0.2	6 horas – 6 horas	2.5 ml/s
ETAPA 1	Carga Hidráulica Nº 1	0.2	6 horas – 6 horas	2.5 ml/s
ETAPA 2	Carga Hidráulica Nº 2	0.3	6 horas – 6 horas	3.5 ml/s
ETAPA 3	Carga Hidráulica Nº 3	0.4	6 horas – 6 horas	4.5 ml/s
ETAPA 4	Carga Hidráulica Nº 4	0.6	6 horas – 6 horas	7.0 ml/s

Una vez impulsada el agua residual hacia los humedales, estas serán distribuidas por un conjunto de tuberías de PVC de ½" de diámetro nominal, el sistema de distribución consta de 4 líneas de alimentación, en las líneas laterales se realizaron 3 perforaciones en un lado y a las dos líneas centrales se realizaron 3 perforaciones en cada lado, siendo un total de 12 perforaciones para estas dos líneas centrales. El agua distribuida pasara a través del medio granular conformado por los sustratos de arena gruesa, confitillo y grava gruesa.

Por último el agua tratada será recolectada en el fondo de cada humedal vertical construido, a través de un conjunto de tuberías de PVC de ½" de diámetro nominal, el sistema de recolección constara de 4 líneas de recolección las cuales terminaran en tuberías verticales con la finalidad de

ventilar el medio granular; las tuberías de recolección serán perforados diametralmente opuesta con 17 perforaciones en cada lado, siendo un total de 34 perforaciones por cada línea de recolección; en cuanto al sistema de ventilación estas serán tuberías de material de PVC y un diámetro de $\frac{3}{4}$ " , en la parte superior de la tubería se perforaron agujeros con el objetivo de captar mayor oxígeno del ambiente.

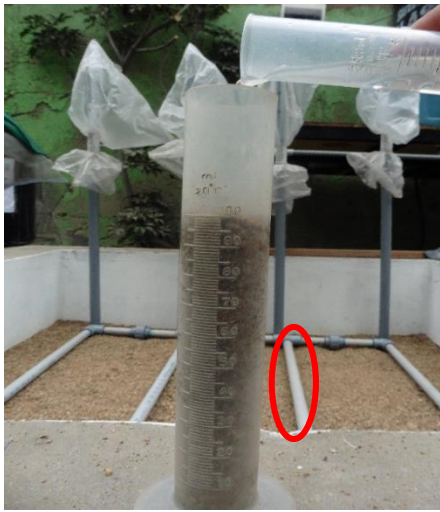


Figura 3-5 Sistema de distribución del caudal



Figura 3-6 Sistema de recolección de agua tratada



Figura 3-7 Sistema de ventilación

En la Figura 3-8 se muestra la distribución de cada sistema de tuberías que fueron implementados en el humedal vertical con la finalidad de garantizar su adecuado funcionamiento.

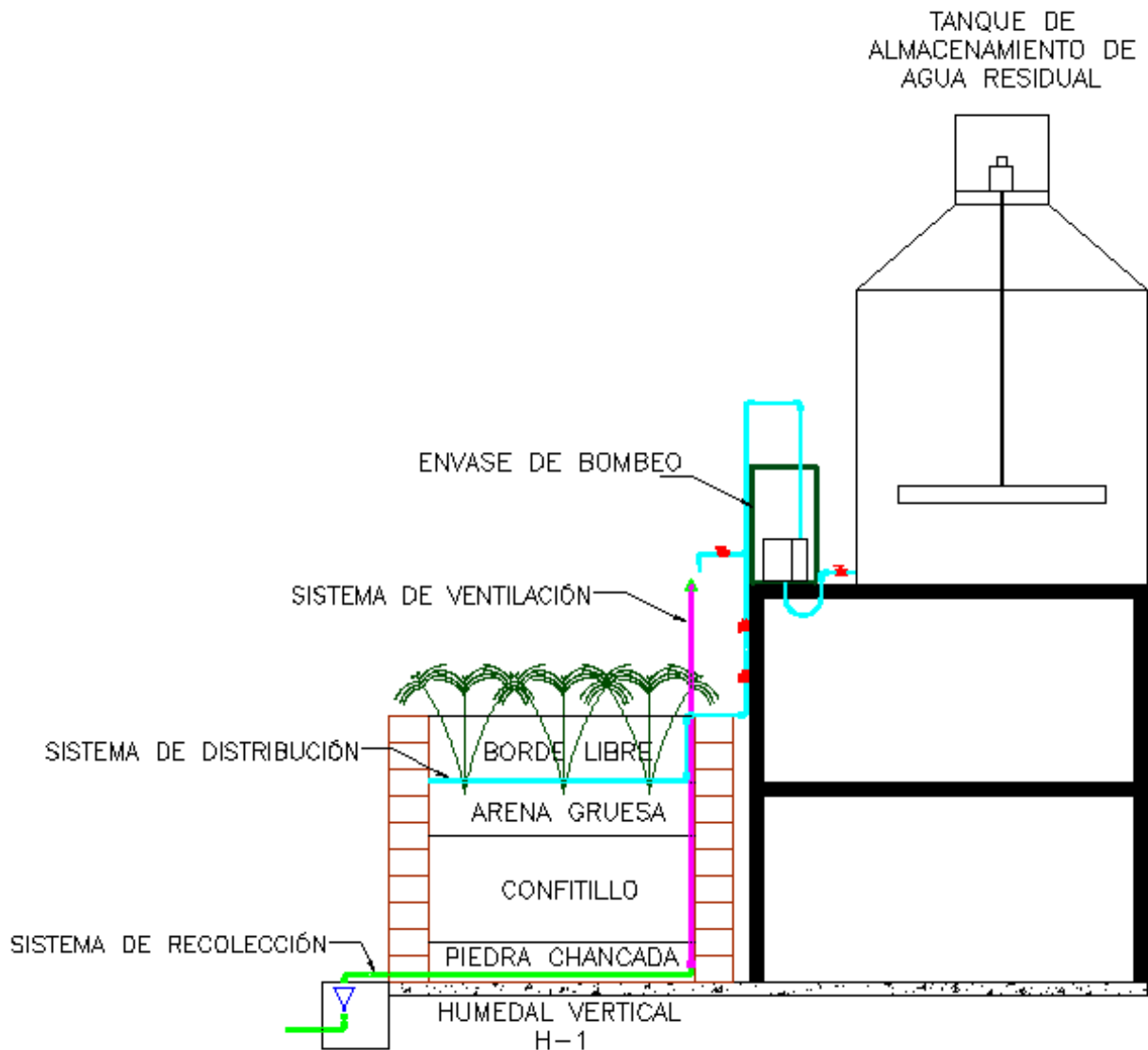


Figura 3-8 Distribución de cada sistema de tuberías en el humedal H-1

Tanque de Almacenamiento de Agua Residual

Para esta investigación se ha adaptado como tanque de almacenamiento del afluente, a un tanque Rotoplast de capacidad de 1100L cuyas dimensiones son de un diámetro 1.10m y una altura 1.43m, este tanque es

de color negro de material de polietileno de alta densidad (PEAD), en el tanque se acondiciono una tubería de ventilación que a la vez nos permitió medir el nivel del agua en el tanque.

Este tanque almacenó el agua proveniente del UASB y con la finalidad de evitar la sedimentación de los sólidos, se instaló un homogenizador automatizado el cual consistía en un motor de baja revolución, un eje de PVC y una paleta homogenizadora de PEAD, el funcionamiento de este homegenizador fue controlado con un temporizador ubicado en el tablero eléctrico; el tiempo de funcionamiento fue de 15 minutos de trabajo y 15 minutos de descanso.

Envase de Bombeo

El envase de bombeo fue acondicionado en un bidón de material de polietileno de alta densidad de 5 galones de capacidad, dentro de este se instaló la bomba sumergible; con la finalidad de garantizar su protección y que trabaje sumergida a un mismo nivel de agua.

El equipo de bombeo a considerar fue una bomba sumergible de pecera con un caudal máximo de bombeo de 5000L/h y a una altura máxima de 5.00 metros; este equipo de bombeo trabajo de manera discontinua, siendo controlada a través de un temporizador el cual fue ubicado en el tablero eléctrico del sistema, cabe decir que el tiempo de trabajo y de descanso fue de 6 horas.

Humedal Vertical H-1

El humedal vertical H-1 fue construido de material noble, con muros de ladrillo que fueron impermeabilizados; la sección transversal fue cuadrangular, sus dimensiones fueron de 1.00m de lado y una altura de 1.00m; en el fondo del humedal se acomodó las tuberías de recolección del agua tratada, seguidamente el medio granular; siendo este conformado por tres capas de diferentes sustratos, la primera capa será de 0.15m de piedra chancada – grava de 20-40mm, 0.40 de confitillo – grava de 3-10mm y 0.20 de arena gruesa; por encima del medio granular se instalaron las tuberías de distribución del agua residual.

Las tuberías de recolección ubicados en el fondo del humedal fueron conectadas a tuberías verticales, las cuales tuvieron la función de ingresar aire hasta el fondo del humedal vertical.

El humedal vertical H-1 fue sembrado con 09 unidades del vegetal *Cyperus Alternifolius*; las cuales tuvieron que ser regadas por aspersión durante las dos primeras semanas de la puesta en marcha.

Humedal Vertical H-2

El humedal vertical H-2 fue construido de los mismos materiales y dimensiones del humedal H-1; de igual manera en el fondo del humedal se acomodó las tuberías de recolección del agua tratada, seguidamente el medio granular; siendo este conformado por tres capas de diferentes sustratos, la primera capa será de 0.15m de piedra chancada – grava de 20-40mm, 0.20 de confitillo – grava de 3-10mm y 0.40 de arena gruesa, como se mencionó anteriormente la única diferencia entre ambos humedales es la altura de cada sustrato que conforman el medio granular; y seguidamente por encima del medio granular se instalaron las tuberías de distribución del agua residual.

Las tuberías de recolección ubicados en el fondo del humedal fueron conectadas a tuberías verticales, las cuales tuvieron la función de ingresar aire hasta el fondo del humedal vertical.

El humedal vertical H-2 también fue sembrado con 09 unidades del vegetal *Cyperus Alternifolius*; las cuales tuvieron que ser regadas por aspersión durante las dos primeras semanas de la puesta en marcha.

Ambos humedales fueron diseñados con un tiempo de retención hidráulico teórico de 1.88 días, para mayor detalle ver el ANEXO N° 2 – DISEÑO DEL HUMEDAL VERTICAL.

3.2.4. Evaluación experimental del Sistema

La evaluación de las cargas hidráulicas correspondió a la parte experimental del sistema, esta inició una vez concluida la etapa - puesta en marcha, a partir de la semana 17 hasta la semana 32; la evaluación de

las diferentes cargas hidráulicas desde las etapas 1 al 4; tal como se muestra en las Tabla 3-2 y Tabla 3-3 descritos anteriormente; con ello se muestra la tabla resumen con las características generales de cada etapa:

Tabla 3-5 Características generales de cada etapa de evaluación

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	EVALUACIÓN	CARGA HIDRÁULICA (m ³ /m ² x12horas)	SEMANA Nº	DURACIÓN (SEMANAS)
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	Puesta En Marcha	0.2	1-16	16
ETAPA 1	Carga Hidráulica Nº 1	0.2	17-20	4
ETAPA 2	Carga Hidráulica Nº 2	0.3	21-24	4
ETAPA 3	Carga Hidráulica Nº 3	0.4	25-28	4
ETAPA 4	Carga Hidráulica Nº 4	0.6	29-32	4

La duración de la etapa de la puesta en marcha fue tomado en consideración a la estabilización del sistema y del tiempo necesario para el desarrollo de las macrófitas dentro de los humedales artificiales que conforman la presente investigación; asimismo el tiempo de duración de cada etapa de evaluación fue propuesto por la tesista en base a investigaciones realizadas por otros investigadores y el tiempo mínimo necesario para obtener una data que permita estudiar el comportamiento del sistema propuesto ante el cambio de las cargas hidráulicas.

Por otro lado, tal como lo muestra la Tabla 3-5, las cargas hidráulicas fueron evaluadas de menor a mayor; la etapa 1 fue evaluada con una carga hidráulica de 0.2m³/m²x12horas, para obtener esta carga hidráulica se utilizó la siguiente ecuación:

Carga Hidráulica Superficial (CHS) mm/día

$$= \frac{\text{Caudal (m}^3/\text{día)} \times 1000}{\text{Area (m}^2)} \dots (*)$$

Como deseamos obtener una CHS igual a 0.2m³/m²x12horas y tenemos un área transversal fija de 1m², pues se procedió a reemplazar los valores que tenemos en la ecuación (*) para calcular el caudal de alimentación

para cada humedal con el fin de obtener la CHS requerida para la evaluación, tenemos:

$$200 \text{ mm/día} = \frac{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \times 1000}{1 \text{ m}^2}$$

$$Q = 0.2 \text{ m}^3/\text{día} \approx 2.5 \text{ ml/s}$$

Y así sucesivamente se procedió a determinar los caudales de alimentación para cada etapa de evaluación según la carga hidráulica requerida a evaluar, tal como se mostró anteriormente en la Tabla 3-6 Características de funcionamiento de cada etapa de la evaluación.

Tabla 3-6 Características de funcionamiento de cada etapa de la evaluación

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	EVALUACIÓN	CARGA HIDRÁULICA ($\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12 \text{ horas}$)	ALIMENTACIÓN-DESCANSO	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	Puesta En Marcha	0.2	6 horas – 6 horas	2.5 ml/s
ETAPA 1	Carga Hidráulica N° 1	0.2	6 horas – 6 horas	2.5 ml/s
ETAPA 2	Carga Hidráulica N° 2	0.3	6 horas – 6 horas	3.5 ml/s
ETAPA 3	Carga Hidráulica N° 3	0.4	6 horas – 6 horas	4.5 ml/s
ETAPA 4	Carga Hidráulica N° 4	0.6	6 horas – 6 horas	7.0 ml/s

3.3. Puntos de monitoreos y parámetros requeridos

En esta sección se describirá los puntos de monitoreo a considerar en el proceso de evaluación del sistema, también los parámetros de medición para cada uno de ellos, y por último la frecuencia y la metodología con que serán analizados estos.

3.3.1. Determinación de puntos de monitoreo

Para realizar la evaluación experimental del sistema se determinó tres puntos de monitoreo, las cuales están ubicadas a la salida del envase de bombeo y en los efluentes de los humedales H-1 y H-2, cabe recalcar que no se realizó el análisis de la calidad del agua residual que ingresa al

tanque de almacenamiento debido a que el objetivo de la tesis es determinar la reducción de los contaminantes que ingresan a los humedales verticales.

Los puntos de monitoreo denominados se denominan como P-1, el cual está ubicado a la salida del envase de bombeo; el segundo punto de monitoreo denominado P-2, está ubicado en el efluente del humedal vertical H-1; y por último el tercer punto de monitoreo P-3, también ubicado en el efluente del humedal vertical H-2; lo mencionado anteriormente se visualiza en la Figura 3-9 Ubicación de puntos de monitoreo en el sistema de investigación.

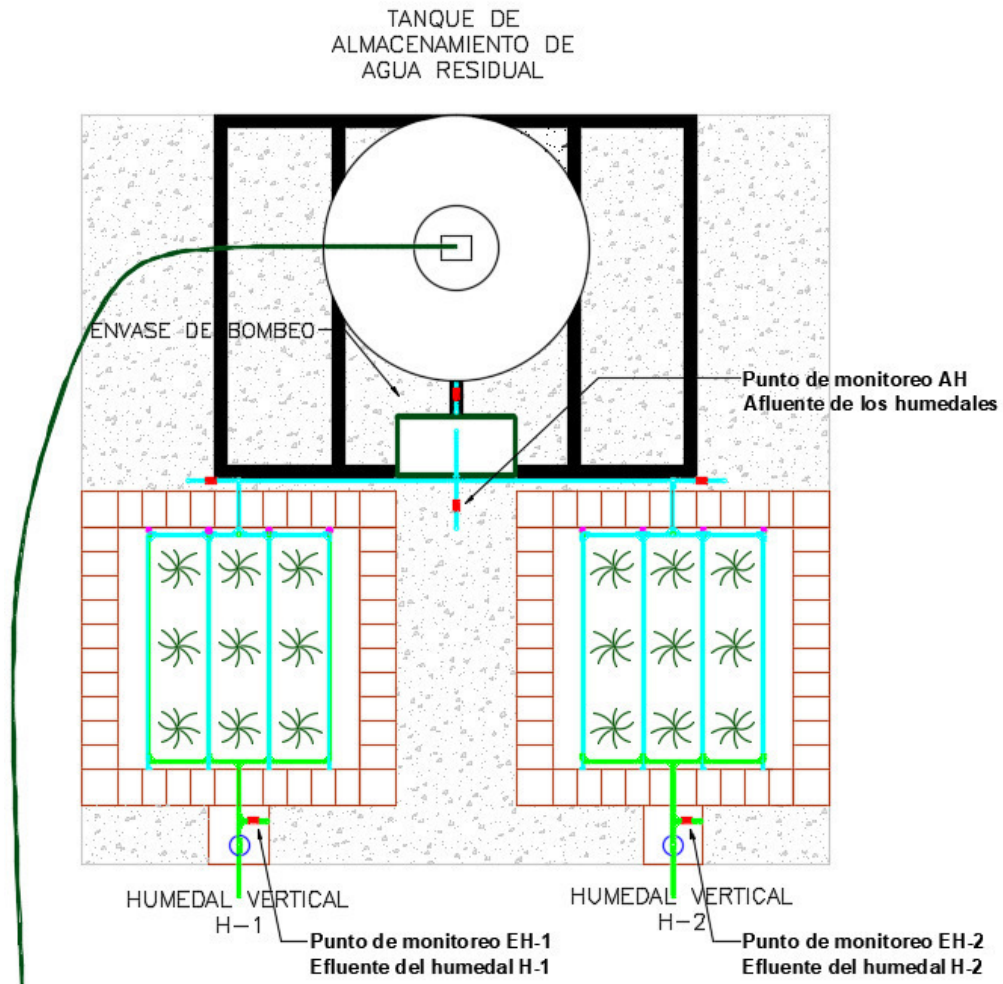


Figura 3-9 Ubicación de puntos de monitoreo en el sistema de investigación

3.3.2. Parámetros de medición y control

3.3.2.1. Parámetros físicos

Los parámetros físicos por evaluar en la investigación fueron los siguientes:

- Temperatura del agua residual
- pH
- Conductividad
- Turbiedad
- Temperatura Ambiental
- Humedad Relativa
- Crecimiento de los vegetales

3.3.2.2. Parámetros químicos y biológicos

Los parámetros químicos y biológicos por evaluar en el presente proyecto de investigación fueron los siguientes:

- Oxígeno Disuelto
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Sólidos Suspendidos Totales
- Nitrógeno Amónico
- Nitritos
- Nitratos
- Nitrógeno total
- Fosforo Total
- Hierro Total
- Coliformes Termotolerantes

3.3.3. Cronograma de medición y control

El análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos fueron realizados durante un periodo de 32 semanas, los cuales fueron divididos en 5 etapas.

Durante todo este periodo de evaluación no fue posible realizar todos los análisis en cada semana correspondiente; por lo que a continuación se muestra en la Tabla 3-7 los monitoreos realizados por cada semana.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de los humedales, la mayoría de los parámetros físicos fueron medidos diariamente y dos veces al día a excepción de la humedad relativa, temperatura del ambiente y el crecimiento de los vegetales; a diferencia de ellos, los parámetros químicos y biológicos en su mayoría fueron medidos semanalmente, cabe recalcar que los parámetros de fosforo total y coliformes termotolerantes fueron medidas por única vez en cada etapa del 1 al 4 y por último el parámetro de hierro total fue medido una sola vez en la etapa 4; en la Tabla 3-8 se muestra la frecuencia de medición de cada parámetro analizado en cada etapa evaluada.

3.3.4. Protocolo de medición de parámetros evaluados

La metodología que se aplicó para evaluar cada parámetro físico, químico y biológico en los puntos de monitoreo se detalla en la Tabla 3-9 Metodología aplicada para evaluar cada parámetro.

Tabla 3-8 Frecuencia de medición de los parámetros por cada etapa

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA DE MEDICION DE PARAMETROS POR CADA ETAPA				
	ETAPA – PUESTA EN MARCHA	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4
PARAMETROS FISICOS					
Temperatura de la muestra	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día
pH	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día
Conductividad	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día
Turbiedad	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día
Temperatura Ambiental	1 vez/día	1 vez/día	1 vez/día	1 vez/día	1 vez/día
Humedad Relativa	1 vez/día	1 vez/día	1 vez/día	1 vez/día	1 vez/día
Crecimiento de los vegetales	1 vez/semana	2 veces/mes	2 veces/mes	2 veces/mes	2 veces/mes
PARAMETROS QUIMICOS Y BIOLÓGICOS					
Oxígeno Disuelto	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día	2 veces/día
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana
Sólidos Suspendidos Totales	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana
Nitrógeno Amoniacal	-	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana
Nitritos	-	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana
Nitratos	-	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana
Nitrógeno total	-	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana	1 vez/semana
Fosforo Total	-	1 vez/etapa	1 vez/etapa	1 vez/etapa	1 vez/etapa
Hierro Total	-	-	-	-	1 vez/etapa
Coliformes Termotolerantes	-	1 vez/etapa	1 vez/etapa	1 vez/etapa	1 vez/etapa

Tabla 3-9 Metodología aplicada para evaluar cada parámetro

DESCRIPCIÓN	METODOLOGIA APLICADA PARA EVALUAR CADA PARAMETRO
PARAMETROS FISICOS	
Temperatura de la muestra	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Standard Methods por the examinaton of wáter and wastewater 2550B. A través del equipo medidor portátil HQ11d de marca HACH
pH	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Standard Methods por the examinaton of wáter and wastewater 4500_H*B. A través del equipo medidor portátil HQ11d de marca HACH
Conductividad	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Standard Methods por the examinaton of wáter and wastewater 2510B.
Turbiedad	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Standard Methods por the examinaton of wáter and wastewater 21.30B. A través del equipo medidor portátil turbidímetro 2100Q
Temperatura Ambiental	Este parámetro se midió con un Termohigrometro Modelo-303C con rangos de medición con variaciones entre -20°C a 40°C
Humedad Relativa	Este parámetro se midió con un Termohigrometro Modelo-303C
Crecimiento de los vegetales	Este parámetro se midió con una wincha de 5 metros.
PARAMETROS QUIMICOS Y BIOLÓGICOS	
Oxígeno Disuelto	Este parámetro se midió con un equipo medidor portátil HQ40d multimedidor digital de dos parámetros
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Standard Methods por the examinaton of wáter and wastewater 5210 B.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Método 8000 HACH (método de digestor de reactor); para agua, aguas residuales y agua de mar; aprobado por la USEPA para realizar informes sobre análisis de aguas residuales
Solidos Suspendidos Totales	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Standard Methods por the examinaton of wáter and wastewater 2540 D – Total Suspended Solids Dried At 103-105°C.
Nitrógeno Amoniacal	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Método 8038 HACH (método Nessler); para agua, aguas residuales y agua de mar; aprobado por la USEPA para realizar informes sobre análisis de aguas residuales
Nitritos	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Método 8507 HACH (método de diazotización); para agua, aguas residuales y agua de mar; aprobado por la USEPA para realizar informes sobre análisis de aguas residuales

DESCRIPCIÓN	METODOLOGIA APLICADA PARA EVALUAR CADA PARAMETRO
Nitratos	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Método 8039 HACH (método de reducción de cadmio); para agua, aguas residuales y agua de mar; aprobado por la USEPA para realizar informes sobre análisis de aguas residuales
Nitrógeno total	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Método 10072 HACH (método digestión con persulfato); para agua, aguas residuales y agua de mar; aprobado por la USEPA para realizar informes sobre análisis de aguas residuales
Fosforo Total	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Método 8190 HACH (método de PhosVer 3 y digestión con persulfato ácido); para agua, aguas residuales y agua de mar; aprobado por la USEPA para realizar informes sobre análisis de aguas residuales
Hierro Total	Este parámetro se analizó según el EPA Method 200.7 – Determination of Metal and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry.
Coliformes Termotolerantes	Este parámetro se analizó según lo indicado en el Standard Methods por the examinaton of wáter and wastewater APHA, AWWA, WEF 22nd Ed. 2012 – 9221 E/9221C

4. CAPITULO IV OBTENCIÓN Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se detallan los resultados de los parámetros físicos, químicos y biológicos que fueron evaluados diariamente y semanalmente para los 3 puntos de monitoreo durante el proceso de evaluación experimental del sistema:

- ❖ Punto de monitoreo N° 1: AH = Afluente de los Humedales
- ❖ Punto de monitoreo N° 2: EH-1 = Efluente del Humedal H-1
- ❖ Punto de monitoreo N° 3: EH-2 = Efluente del humedal H-2

El proceso de evaluación experimental tuvo una duración de 32 semanas, siendo su fecha de inicio el 09 de setiembre del 2016 y su fecha de término el 28 de abril del 2017; asimismo está dividido en 5 etapas las cuales detallaremos a continuación sus principales características de funcionamiento de cada una:

❖ ETAPA - PUESTA EN MARCHA

La etapa – Puesta en Marcha se inició en la semana 1 hasta la semana 16, donde el sistema alcanzo su estabilidad en cuanto al parámetro evaluado de DQO y turbiedad; en esta etapa los humedales fueron alimentados con un caudal de 2.5ml/s con una carga hidráulica de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y un tiempo de alimentación y descanso de 6 horas.

❖ ETAPA 1: CARGA HIDRAÚLICA DE $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$

La etapa 1 se inició en la semana 17 hasta la semana 20, iniciándose seguidamente de la culminación de la etapa – Puesta en Marcha; en esta etapa los humedales fueron alimentados con un caudal de 2.5ml/s con una carga hidráulica de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y un tiempo de alimentación y descanso de 6 horas.

❖ ETAPA 2: CARGA HIDRAÚLICA DE $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$

La etapa 2 se inició en la semana 21 hasta la semana 24, iniciándose seguidamente de la culminación de la etapa 1; en esta etapa los humedales fueron alimentados con un caudal de 3.5ml/s con una carga hidráulica de $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y un tiempo de alimentación y descanso de 6 horas.

❖ ETAPA 3: CARGA HIDRÁULICA DE $0.4\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$

La etapa 3 se inició en la semana 25 hasta la semana 28, iniciándose seguidamente de la culminación de la etapa 2; en esta etapa los humedales fueron alimentados con un caudal de 4.5ml/s con una carga hidráulica de $0.4\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y un tiempo de alimentación y descanso de 6 horas.

❖ ETAPA 4: CARGA HIDRÁULICA DE $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$

La etapa 4 se inició en la semana 29 hasta la semana 32, iniciándose seguidamente de la culminación de la etapa 3; en esta etapa los humedales fueron alimentados con un caudal de 7.0ml/s con una carga hidráulica de $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y un tiempo de alimentación y descanso de 6 horas.

4.1. Análisis físico-químico

4.1.1. Temperatura ambiental

En el Gráfico 4-1 se muestra la temperatura ambiental promedio en cada etapa de evaluación, siendo estos valores promedio de 25.73°C , 28.23°C , 27.57°C , 27.31°C y 25.18°C para la etapa puesta en marcha, etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Cabe recalcar que todo el proceso de evaluación se realizó en tres estaciones diferentes del año. La etapa – puesta en marcha se evaluó en la estación de primavera (semana 1 a la semana 16), para las etapas 1, 2 y 3 fueron evaluados durante la estación de verano (semana 1 a la semana 28) y finalmente la etapa 4 se evaluó en la estación de otoño (semana 29 a la semana 32).

De acuerdo con el Gráfico 4-1 la temperatura durante la etapa – puesta en marcha tiende a incrementarse hasta la etapa 1, el cual se mantiene casi constante con un valor promedio de 28.23°C y para luego descender en las siguientes etapas, donde se registró una temperatura promedio mínima de 25.18°C en la etapa 4.

En el Gráfico 4-2 se indica la variación promedio, máxima y mínima de la temperatura ambiental durante los meses de evaluación del sistema, en ella se puede observar que las temperaturas máximas fueron registradas en el mes de enero (estación de verano).

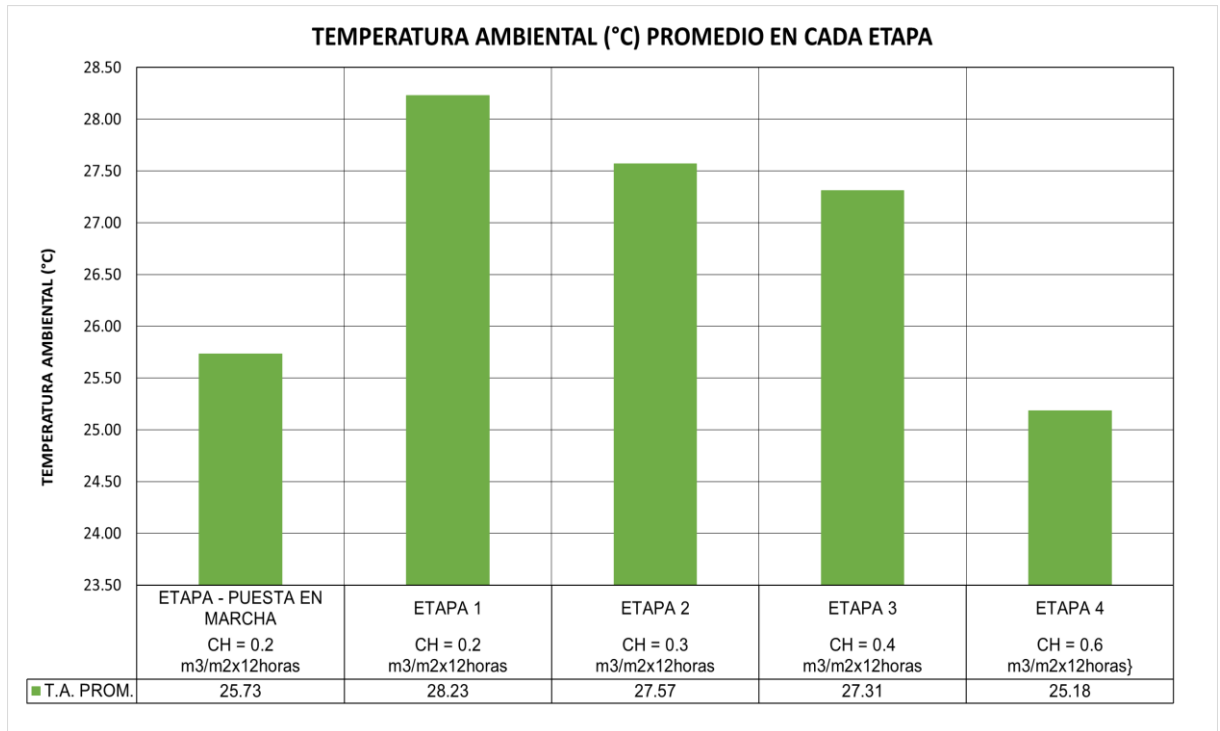


Gráfico 4-1 Temperatura Ambiental promedio en cada etapa de evaluación

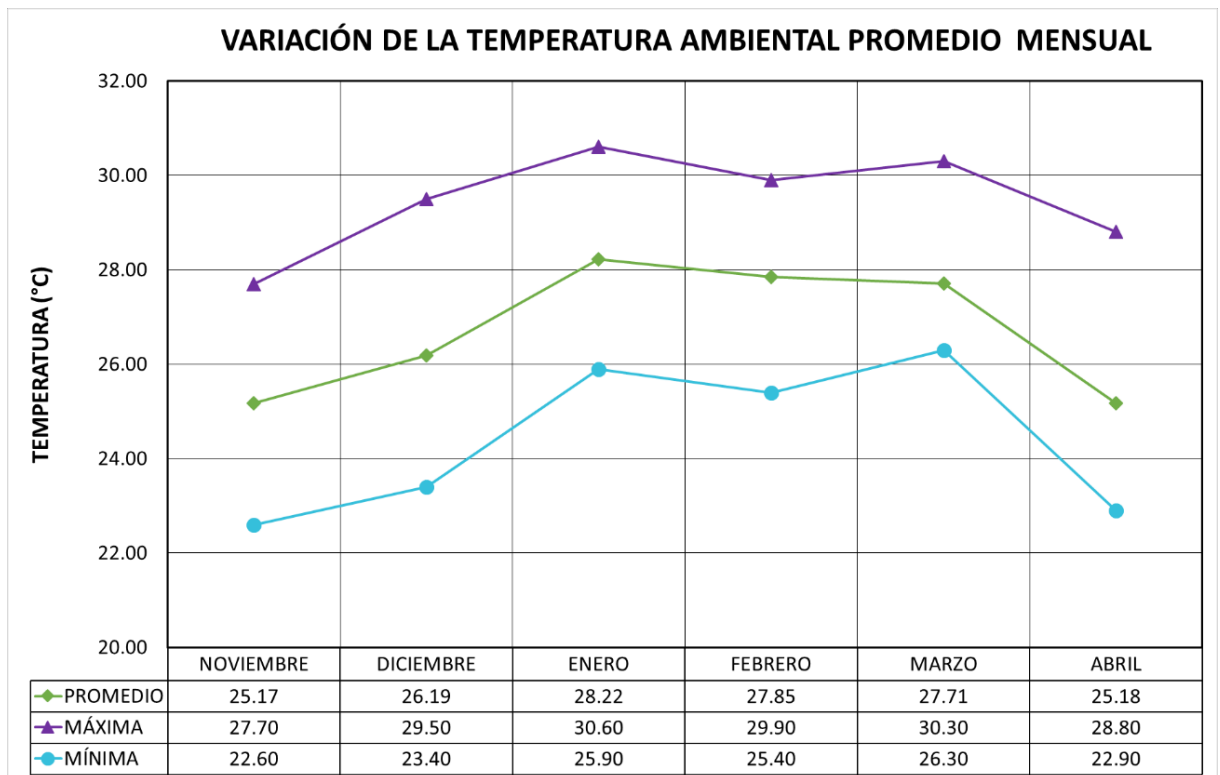


Gráfico 4-2 Variación de la temperatura ambiental promedio mensual

4.1.2. Temperatura del agua residual

Se realizó el Gráfico 4-3 Temperatura Promedio en cada etapa de evaluación, en el cual se observa que la temperatura del punto AH es siempre mayor a las temperaturas de los puntos EH-1 y EH-2 durante todas las etapas de evaluación, estas diferencias entre el punto AH y el punto EH-1 son de 0.55°C, 0.76°C, 0.71°C, 0.53°C y 0.29°C, y las diferencias con el punto EH-2 son de 0.70°C, 0.97°C, 0.78°C, 0.65°C y 0.43°C para las etapa puesta en marcha, etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente en ambos humedales; probablemente la disminución de la temperatura en los efluentes se vio influenciado por las corrientes de aire que ingresan al humedal a través de las tuberías de ventilación, las cuales se encuentran conectadas con las tuberías de recolección del agua tratada haciendo que la temperatura de los efluentes puedan disminuir; otra causa posible de la disminución de la temperatura se debió a las diferentes reacciones de oxidación y síntesis de la materia orgánica realizada por los microorganismos, especialmente las bacterias heterótrofas y autótrofas, que se originan en un proceso aerobio o anóxico de degradación de materia orgánica (Jiménez Douglas, 2010).

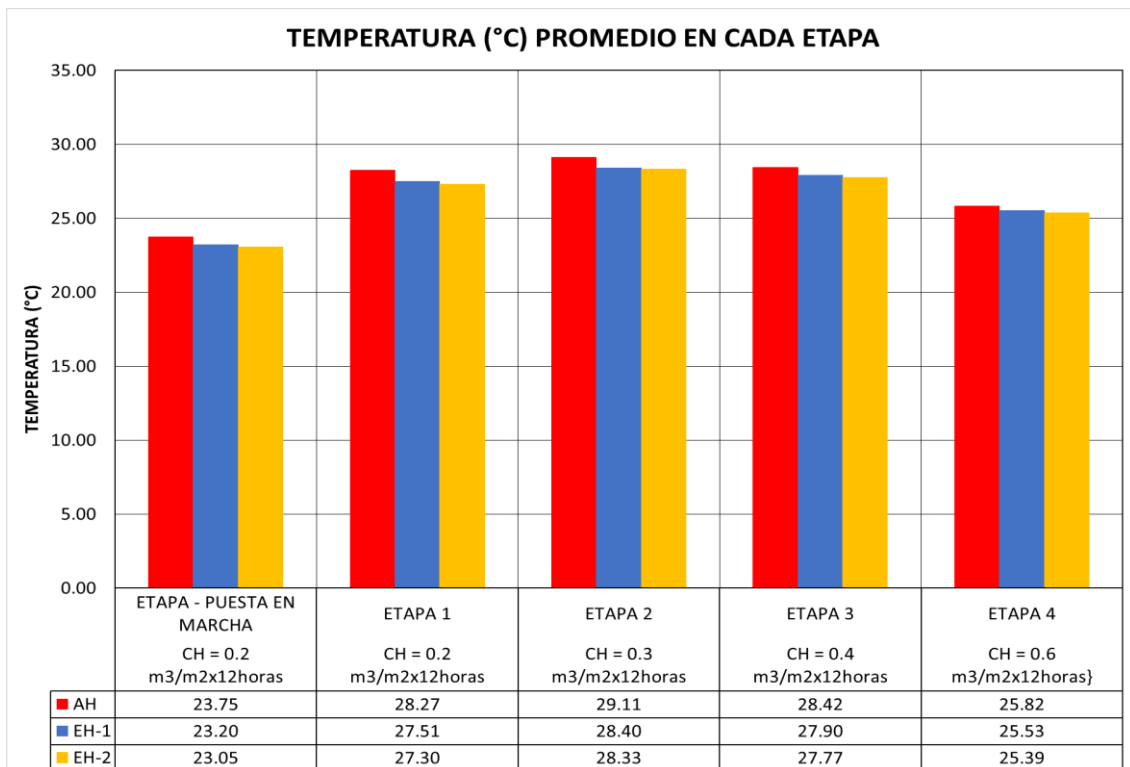


Gráfico 4-3 Temperatura Promedio en cada etapa de evaluación

Asimismo, en casi todas las semanas la temperatura del efluente del humedal H-2 es inferior a la temperatura del efluente del humedal H-1, esta diferencia posiblemente se debió al mayor tiempo de retención hidráulica del humedal H-2 respecto al otro, lo cual permite que los procesos de conducción de calor del agua residual al medio granular sea más acentuado (Bohórquez Bedoya, 2015).

En el Gráfico 4-4 se muestra la variación promedio mensual de la temperatura ambiental y del agua residual, de acuerdo a ello se puede deducir que mientras la temperatura ambiental promedio mensual va en aumento la temperatura del agua residual también aumenta lo cual ocurre hasta el mes de enero, a partir del mes de febrero la temperatura ambiental comienza a descender y la temperatura del agua residual sigue en aumento hasta el mes de febrero para luego descender durante los meses de marzo y abril.

De los resultados de la investigación se determina que la diferencia entre la temperatura ambiental y la temperatura del agua residual en los efluentes va disminuyendo conforme al paso del tiempo y al crecimiento de los vegetales. Ambos humedales verticales fueron sembrados con macrófitas las cuales tienen la capacidad de amortiguar las variaciones ambientales, reduciendo la intensidad de la luz sobre el medio granular evitando grandes gradientes de temperatura en las partes más profundas del medio granular (García Serrano & Corzo Hernández, 2008), lugar donde se tomó la muestra de los efluentes H-1 y H-2.

También se observa que la temperatura ambiental promedio mensual es superior a la temperatura del agua residual hasta el mes diciembre, siendo casi iguales en el mes de enero y luego a partir del mes de febrero es menor a la temperatura del agua residual lo cual coincide con el descenso de la temperatura ambiental, posiblemente esto obedece a que el calor específico que presenta el agua residual es mucho mayor al calor específico del aire, lo cual hace que la variación de la temperatura del aire sea más rápida que la variación de la temperatura del agua residual, es decir que ante variaciones fuertes de temperatura durante el día, la temperatura del aire es menor a la temperatura del agua residual, para poder afirmar esta hipótesis haría falta

realizar mediciones cada hora de la temperatura del medio ambiente y del agua residual para poder analizar su variación horaria durante el día (Metcalf & Eddy, 1995).

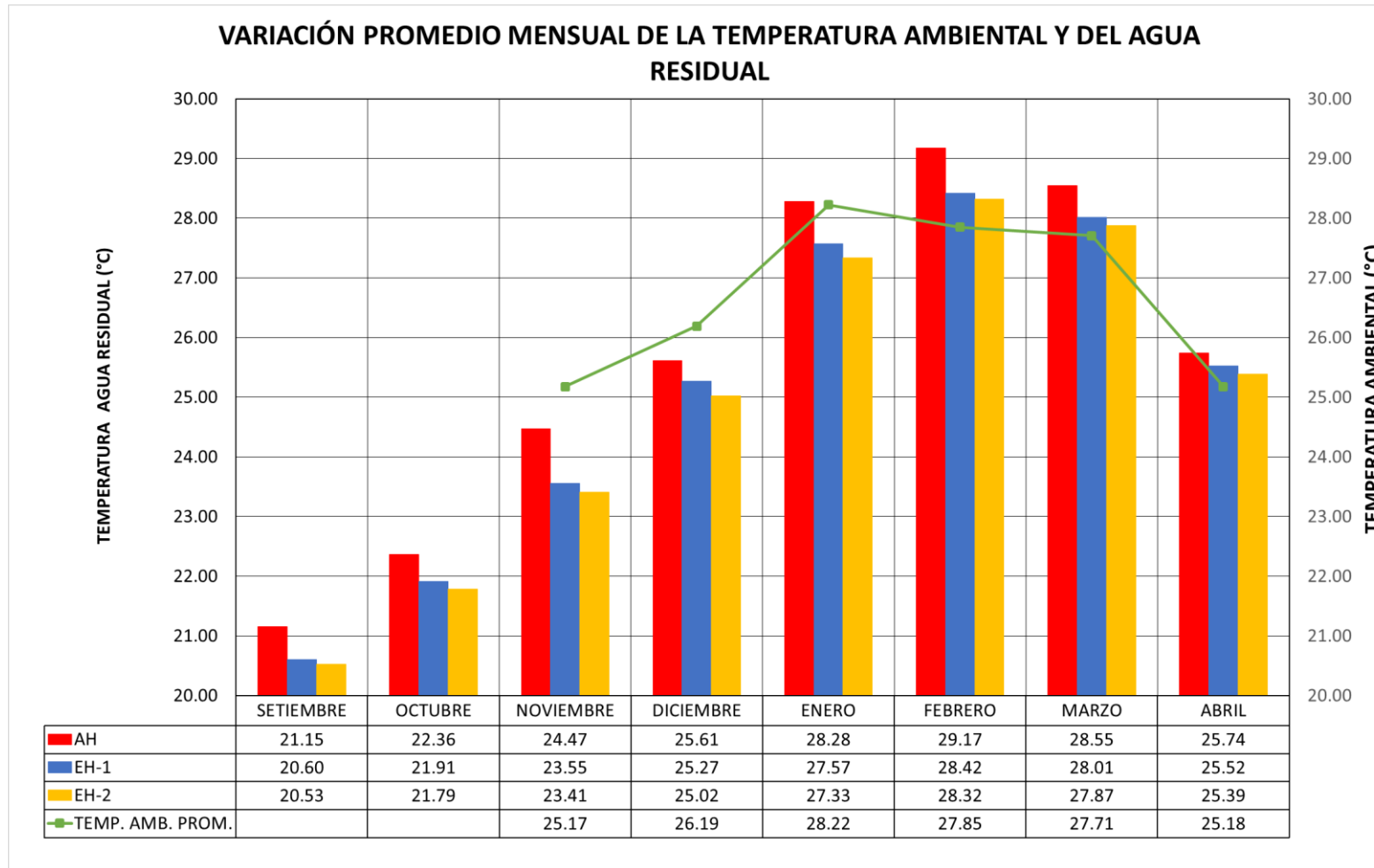


Gráfico 4-4 Variación promedio mensual de la temperatura ambiental y del agua residual

4.1.3. pH

De la Tabla 4-1 la variación entre el pH máximo y mínimo en todos los puntos de monitoreo se encuentran dentro del rango permitido de 4-9.5 pH que pueden tolerar los microorganismos, y así puedan oxidar y sintetizar la materia orgánica.

Tabla 4-1 pH máximo, mínimo y promedio en cada etapa de evaluación

ETAPA	CH (m ³ /m ² x12horas)	MAXIMO			MINIMO			PROMEDIO		
		AH	EH-1	EH-2	AH	EH-1	EH-2	AH	EH-1	EH-2
ETAPA – PM	0.2	7.25	6.88	6.71	6.79	6.30	6.07	7.05	6.57	6.33
ETAPA 1	0.2	7.29	6.82	6.63	7.18	6.71	6.37	7.24	6.76	6.49
ETAPA 2	0.3	7.21	6.69	6.53	7.04	6.59	6.30	7.15	6.66	6.45
ETAPA 3	0.4	7.42	6.54	6.37	6.88	6.42	6.21	7.08	6.47	6.29
ETAPA 4	0.6	7.08	6.42	6.25	6.97	6.24	6.02	7.03	6.30	6.13

* ETAPA – PM = Etapa - Puesta En Marcha

Del Gráfico 4-5 se visualiza que el valor promedio del pH en el punto AH es siempre superior a los valores del pH de los puntos EH-1 y EH-2, este descenso de pH es originado a consecuencia de la reducción del nitrógeno amoniacal (véase 4.2.4 Nitrógeno Amoniacal) que ocurre en ambos humedales, este descenso de pH es característico en los humedales de flujo vertical, asimismo de acuerdo a estudios se ha determinado que el proceso de nitrificación libera iones H⁺ en la transformación microbiana de nitrógeno amoniacal a nitrato, lo cual ocasiona un descenso del pH (Vymazal, 2007).

Asimismo se puede observar diferencias entre el pH del Afluente y el efluente del humedal H-1, siendo estas diferencias de 0.48, 0.49, 0.49, 0.61 y 0.73, y para con el efluente del humedal H-2 las diferencias son de 0.78, 0.75, 0.69, 0.79 y 0.90 para la etapa puesta en marcha, etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente en ambos humedales; las diferencias entre el afluente y efluente en cada humedal se mantiene casi constante durante la etapa puesta en marcha, etapas 1 y 2, caso contrario ocurre en las etapas 3 y 4 donde la diferencia se incrementa; a mediados de la etapa 3 se pudo cuantificar que la concentración de nitritos aumento significativamente en el afluente, este aumento posiblemente influyó en el incremento de la diferencia del pH

entre el afluente y efluente en cada humedal, mayor detalle se realizará en el ítem 4.2.5 Nitrito.

Asimismo, se aprecia que los valores del pH promedio del punto EH-1 está por encima del pH promedio del punto EH-2 en todas las etapas de evaluación, el cual probablemente esté relacionado a una mayor reducción de nitrógeno amoniacal en el humedal H-2, lo cual originó un mayor descenso de pH en el efluente del humedal H-2; mayor detalle se realizará en el ítem 4.2.4 Nitrógeno Amoniacal.

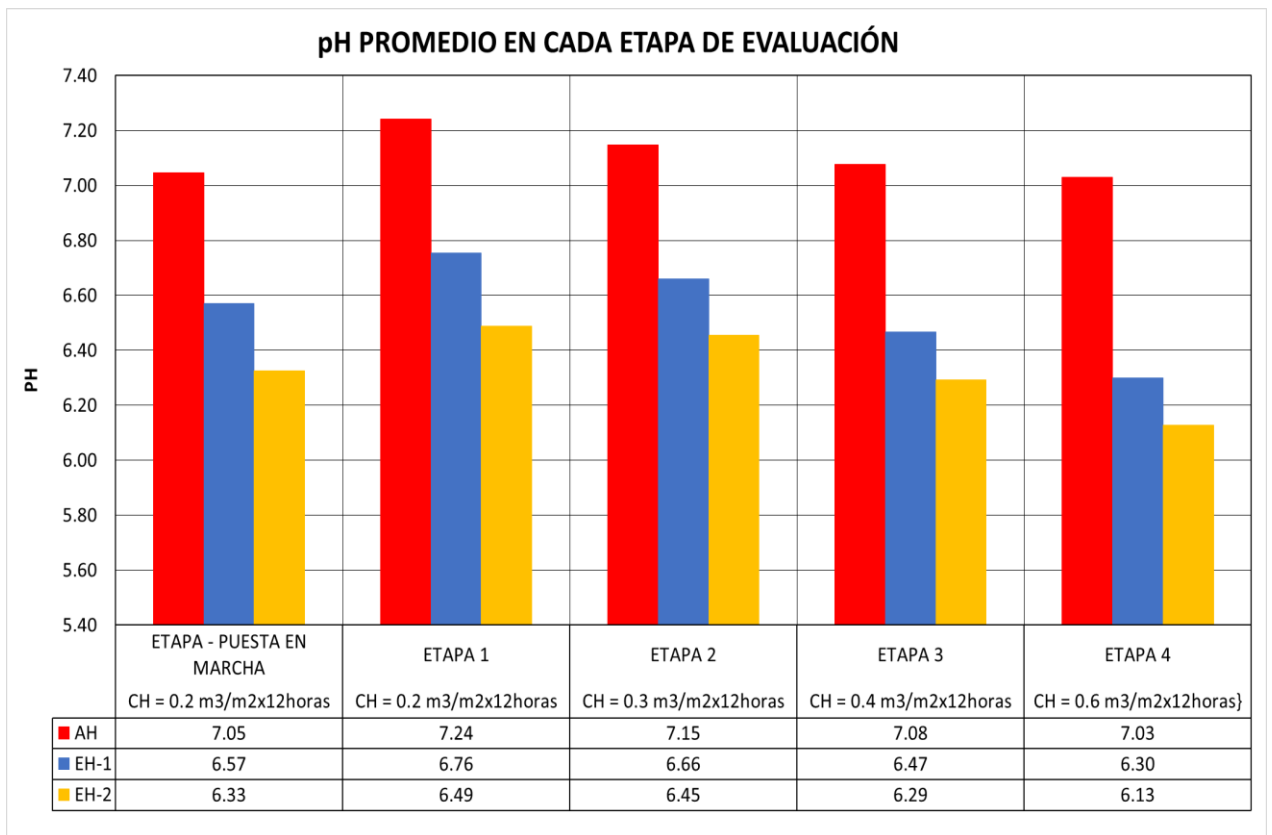


Gráfico 4-5 pH promedio en cada etapa de evaluación

4.1.4. Oxígeno disuelto

Se realizó el Gráfico 4-6 Oxígeno Disuelto promedio en cada etapa de evaluación, en la cual tenemos que la concentración promedio de OD del punto EH-2 es ligeramente mayor a la del punto EH-1 en cada etapa de evaluación, esto probablemente obedece a un mejor desarrollo del sistema radicular de las plantas en el humedal H-2, asimismo a su mayor porcentaje

de finos en el medio granular, lo cual se pudo evidenciar al momento de desmontar el sistema, donde se observó que en el sustrato de arena gruesa las raíces se desarrollaron con mayor densidad en ambos humedales; como se explicó anteriormente el humedal H-2 tiene un mayor volumen de sustrato de arena gruesa lo cual permitió un mejor desarrollo de las raíces en el mismo.

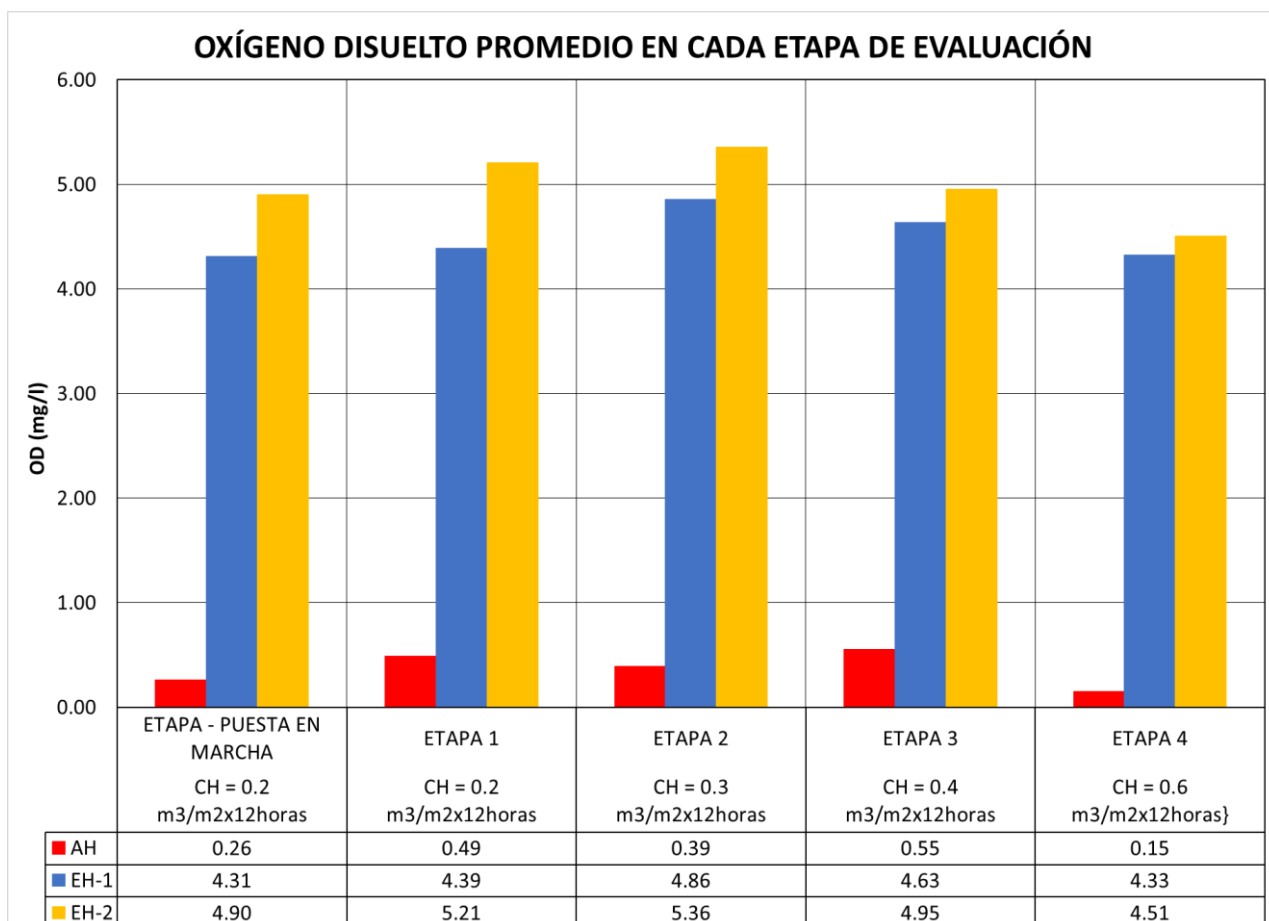


Gráfico 4-6 Oxígeno Disuelto promedio en cada etapa de evaluación

En cuanto al comportamiento promedio de oxígeno disuelto para los dos efluentes en cada etapa de evaluación, se puede visualizar un crecimiento de la concentración de OD desde la etapa – Puesta en Marcha hasta la etapa 2, luego procede a descender la concentración de OD en ambos humedales hasta la etapa 4, siendo la etapa 2 donde se detectó una mayor concentración de OD en los efluentes de ambos humedales, evaluada para una carga hidráulica de $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ cuyos valores en promedio son para el punto EH-1 de 4.86 mg/l y para el punto EH-2 de 5.36 mg/l.

Por otro lado, Torbisco Sáenz (2017), encontró concentraciones de oxígeno disuelto en el efluente de un humedal vertical de 6.30 mg/l para un tiempo de intermitencia de 6 horas y una carga hidráulica de $0.3\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ similar a la etapa 2 de este estudio, a diferencia del humedal EH-2 de este sistema, la altura del sustrato de arena gruesa fue 10 cm mayor a la del humedal EH-2 y se utilizó como macrófita al Vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*).

4.1.5. Turbiedad

En el Gráfico 4-8 se presenta la variación semanal de la turbiedad durante las etapas de evaluación, con los datos presentados se elabora la Tabla 4-2 que muestra la turbiedad máxima, mínima y promedio de cada punto de monitoreo en cada etapa de evaluación.

Tabla 4-2 Turbiedad máxima, mínima y promedio en cada etapa de evaluación

ETAPA	CH ($\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$)	MAXIMA			MINIMA			PROMEDIO		
		AH	EH-1	EH-2	AH	EH-1	EH-2	AH	EH-1	EH-2
ETAPA – PM	0.2	148.50	17.05	16.10	54.63	4.54	2.55	108.73	10.16	6.67
ETAPA 1	0.2	175.23	10.44	9.83	94.16	5.80	2.78	138.54	7.47	5.53
ETAPA 2	0.3	208.00	5.97	2.96	77.50	3.92	1.83	141.88	5.02	2.30
ETAPA 3	0.4	162.34	6.17	4.42	78.94	3.39	2.26	123.85	5.18	3.23
ETAPA 4	0.6	126.90	5.33	5.24	61.69	2.18	2.52	92.48	4.34	3.72

* ETAPA – PM = Etapa - Puesta En Marcha

En el Gráfico 4-8 se observa el comportamiento de las curvas de la concentración de turbiedad, para el caso de la curva del punto AH, se puede notar variaciones significativas durante todas las etapas de evaluación, estas variaciones se deben a que el sistema funcionó durante el proceso constructivo de los nuevos reactores UASB y de la laguna secundaria del CITRAR-FIA-UNI, en donde constantemente habían cortes de ingreso de caudal hacia el reactor UASB; pero estas variaciones no afectaron de manera considerable en las concentraciones de la turbiedad de los efluentes EH-1 y EH-2, ya que sus curvas solo muestran una ligera variación durante casi todas las etapas.

En el Gráfico 4-8 tenemos un rango de eficiencia de reducción de la turbiedad de 97.47% - 77.10% y 98.90% - 85.53% para el humedal H-1 y Humedal H-2

respectivamente, esta reducción se debió principalmente al medio granular de ambos humedales, como se describió anteriormente ambos humedales tienen como sustrato a la arena gruesa en su medio granular, la cual presenta una alta capacidad para retener y filtrar la materia orgánica suspendida y coloidal presentes en el agua residual; también a ello se le suma el aporte del desarrollo radicular de las plantas, la cual mejora la eficiencia, debido a que permiten que el agua residual fluya a velocidades bajas a través del medio granular permitiendo que los materiales suspendidos se depositen.

Es notable que existe una diferencia entre las eficiencias de reducción de ambos humedales, es decir el humedal H-2 es más eficiente en todas las etapas de evaluación debido a la composición de su medio granular, este humedal tiene un mayor porcentaje de finos (arena gruesa) y como se explicó en el párrafo anterior la arena gruesa presenta una buena capacidad para remover la turbiedad del agua residual.

En cuanto al comportamiento de la eficiencia de reducción de la turbiedad para los dos efluentes en cada etapa de evaluación, se puede visualizar en el Gráfico 4-8, que esta eficiencia tiende a aumentar durante la etapa puesta en marcha, luego se aprecia variaciones muy pequeñas durante las etapas 1, 2, 3 y 4, lo cual evidencia que a pesar de las variaciones de las cargas hidráulicas evaluadas en esta investigación, el humedal es capaz de remover las diferentes concentraciones de turbiedad presentes en el afluente.

Por otro lado, Torbisco Sáenz (2017), tuvo una eficiencia de reducción de turbiedad en un humedal vertical de 97.35% para un tiempo de intermitencia de 6 horas y una carga hidráulica de $0.3\text{m}^3/\text{m}^2\text{día}$, siendo este valor inferior al obtenido en la presente investigación para el efluente del humedal EH-2 cuyo valor promedio es de 98.38% para la etapa 2, el cual presenta variables operativas similares. En cambio, Gómez Lordan (2017), obtuvo una eficiencia del orden del 99% para un humedal sembrado con la misma macrófita de este estudio pero con una carga hidráulica de trabajo de $163.8\text{m}^3/\text{m}^2\text{día}$ y una altura del sustrato de arena gruesa de 60cm, en donde radica su mayor eficiencia.

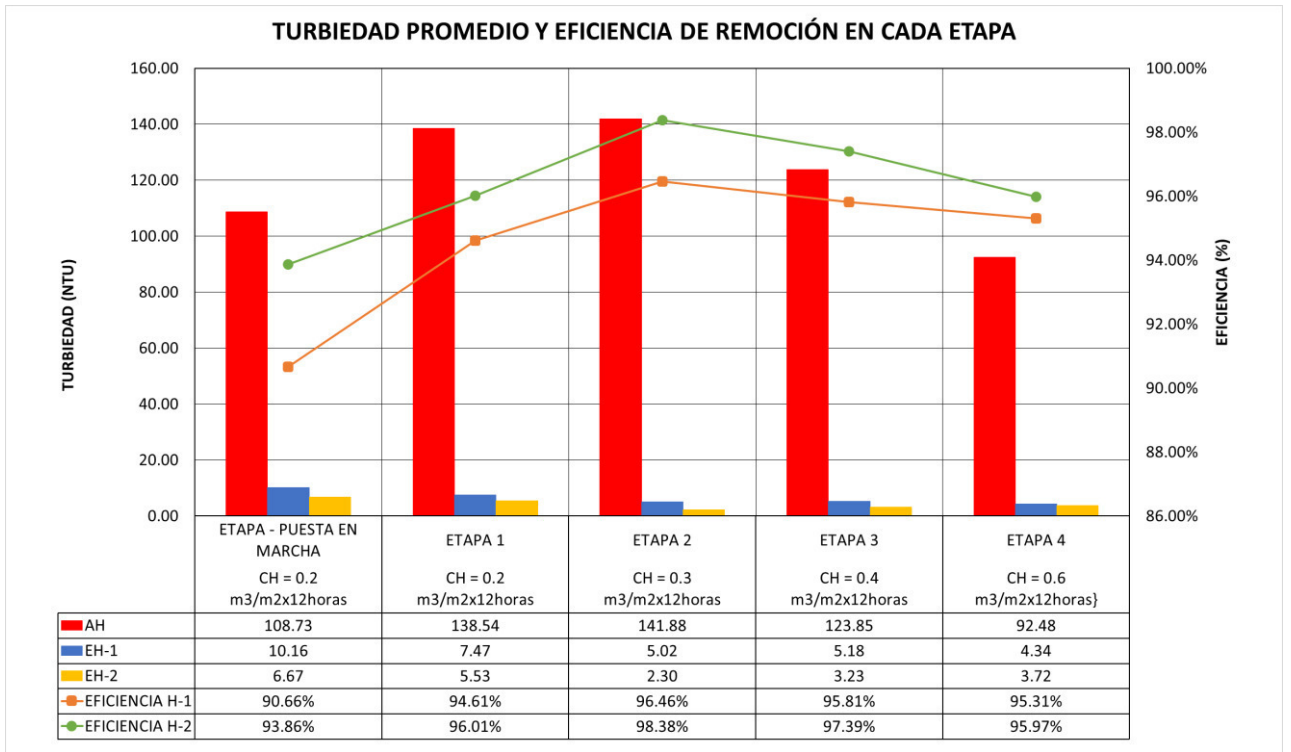


Gráfico 4-7 Turbiedad promedio en cada etapa de evaluación

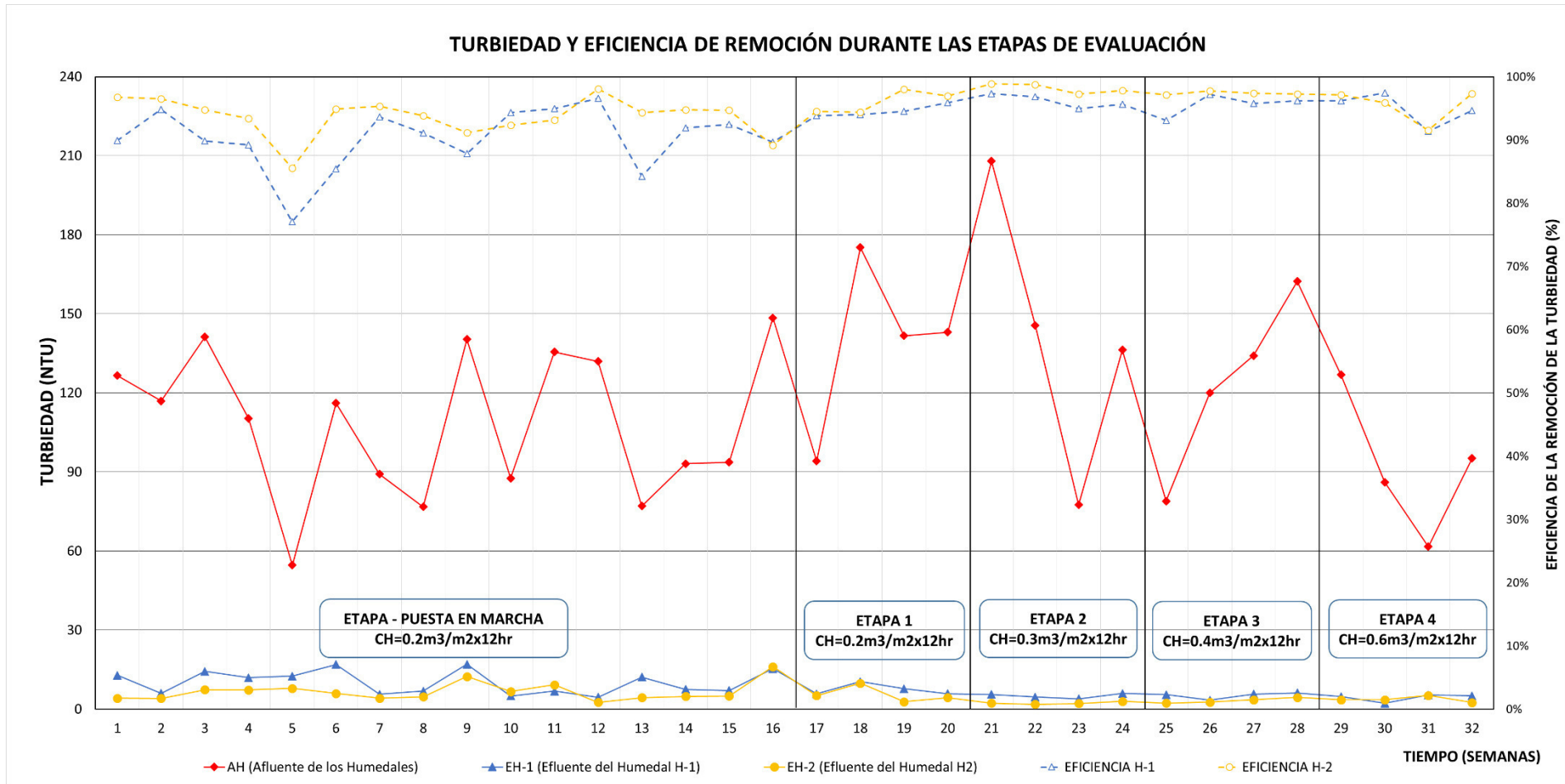


Gráfico 4-8 Turbiedad durante las etapas de evaluación

4.1.6. Conductividad

En el Gráfico 4-9 se puede apreciar que los valores promedios de la conductividad en el afluente es mayor a los del efluente EH-1 y EH-2 en cada etapa de evaluación, esta disminución probablemente se debió a una asimilación de sales disueltas a través de las plantas como parte de sus nutrientes necesarios para el crecimiento de los tallos y hojas, también se aprecia que en la mayoría de las etapas la concentración de la conductividad en el humedal H-1 es menor al de humedal H-2 esto se puede corroborar mediante el mayor crecimiento de la parte aérea de la plantas sembradas en el humedal H-1, tal como se muestra en el ítem 4.1.8.1 Tasa de crecimiento de los vegetales.

Además, podemos observar que la mayor disminución de la conductividad entre el afluente AH y los efluentes EH-1 y EH-2 se dio en la etapa – puesta en marcha, donde estos valores fueron de 130.76 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 153 $\mu\text{s}/\text{cm}$ para el humedal H-1 y H-2 respectivamente.

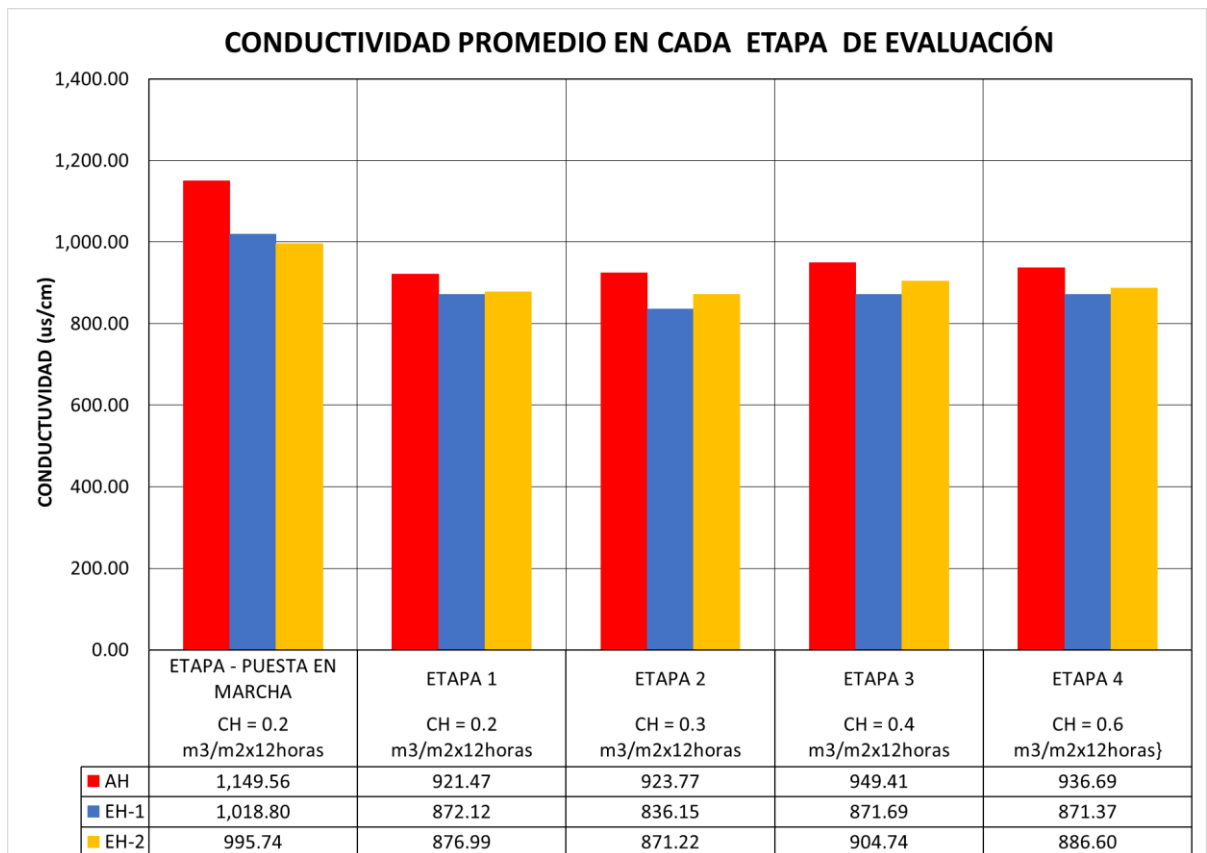


Gráfico 4-9 Conductividad promedio en cada etapa de evaluación

4.1.7. Humedad Relativa

En el Gráfico 4-10 se visualiza la variación de la humedad relativa y la temperatura ambiental, durante la etapa – puesta en marcha y etapa 1 tanto la humedad relativa y la temperatura ambiental van en aumento, luego la temperatura ambiental comienza a descender durante las etapas 2, 3 y 4, mientras que la humedad relativa aumenta hasta la etapa 2 manteniéndose casi constante en las etapas restantes, como podemos observar en la época de verano se puede corroborar (etapa 1, 2 y 3) el comportamiento inverso entre la temperatura ambiental y la humedad relativa.

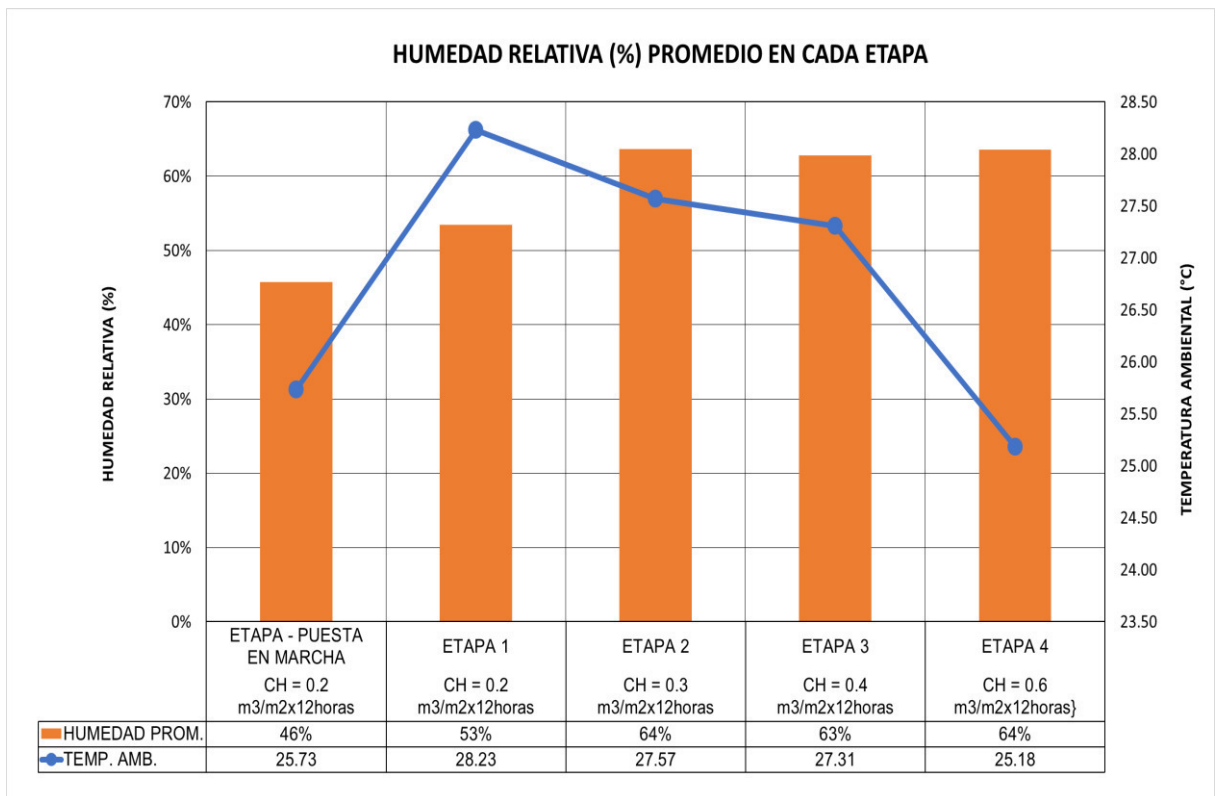


Gráfico 4-10 Humedad Relativa y temperatura ambiental promedio en cada etapa de evaluación

4.1.8. Adaptación y crecimiento del *Cyperus Alternifolius*

El *Cyperus alternifolius* es la macrófita plantada en ambos humedales, se plantaron 9 vegetales en cada humedal, el largo de su raíz fue de 10 cm y en cuanto a la altura de los tallos tuvo una variación desde 5cm hasta los 20cm,

su codificación y distribución de los vegetales lo podemos observar en la Figura 4-2 y Figura 4-3.

Como se menciona en el párrafo anterior la altura de los tallos de cada vegetal plantado fue variable, según investigaciones pasadas se observó que los tallos del *Cyperus Alternifolius* cuando son cortados no continúan con su crecimiento, sobreviviendo solamente los nuevos brotes (Gómez Lordan, 2017).

La cantidad de vegetales que deben plantarse por metro cuadrado no está sujeto a una norma; por ende, se consideró este valor tomando en consideración los aciertos y deficiencias de investigaciones realizadas anteriormente en CITRAR-FIA-UNI y Universidad Agraria de La Molina.

El proceso de adaptación de los vegetales empezó el 22 de agosto de 2016 (3 semanas antes de inicio del proceso de evaluación del sistema), esto consistió en alimentar el medio granular con agua residual proveniente del efluente del reactor UASB, luego los vegetales fueron acondicionados en baldes con agua residual proveniente de la laguna secundaria del CITRAR-FIA-UNI, y por último estos vegetales fueron plantados el 1 de septiembre de 2016 (una semana antes del inicio del proceso de evaluación del sistema) a ambos humedales verticales.

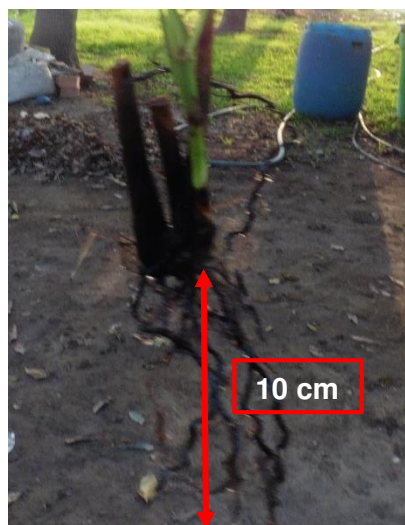
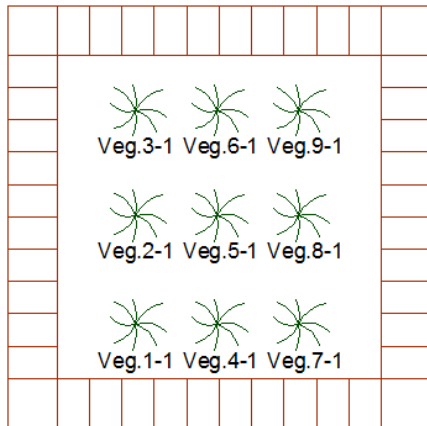
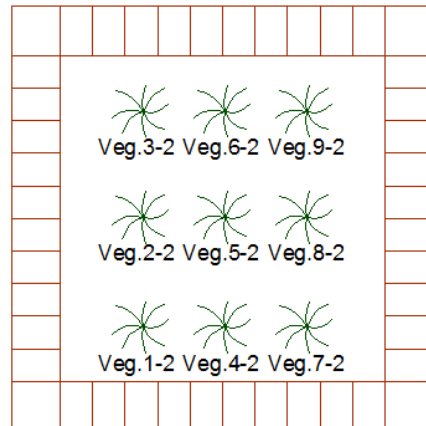


Figura 4-1 Tamaño de la raíz del vegetal plantado



HUMEDAL VERTICAL H-1

Figura 4-2 Codificación y distribución de vegetales plantados en el humedal vertical H-1



HUMEDAL VERTICAL H-2

Figura 4-3 Codificación y distribución de vegetales plantados en el humedal vertical H-2



Figura 4-4 Acondicionamiento de los vegetales

Los 9 vegetales sembrados en cada humedal sobrevivieron durante todo el proceso de evaluación del sistema; por ende, pudieron ser evaluados desde la semana 1 hasta la semana 32; en cada humedal se evaluó la tasa de crecimiento de los vegetales, la altura máxima alcanzada por el vegetal, la profundidad de sus raíces y la forma de distribución y crecimiento de los vegetales.

4.1.8.1. Tasa de crecimiento de los vegetales

En cada humedal se sembraron 9 vegetales los cuales se desarrollaron durante todo el proceso de evaluación del sistema, para determinar la tasa de crecimiento de los vegetales se realizaron mediciones de altura de los vegetales, inicialmente las mediciones fueron una vez por semana luego que alcanzaron una altura considerable se procedió a realizar la medición de manera quincenal.

En el Gráfico 4-11 y Gráfico 4-12 se muestra la variación de la altura de los 9 vegetales sembrados para el humedal H-1 y H-2 respectivamente, la codificación es de acuerdo a la Figura 4-2 y Figura 4-3.

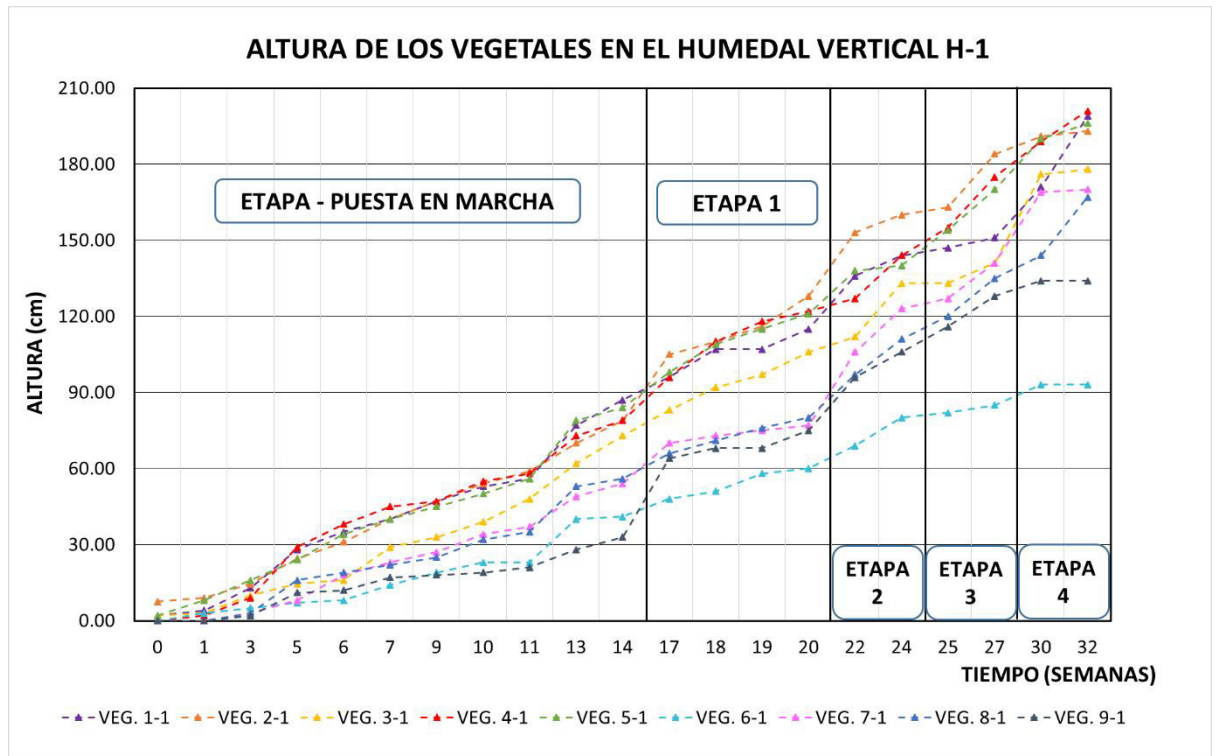


Gráfico 4-11 Altura de los vegetales sembrados en el humedal vertical H-1

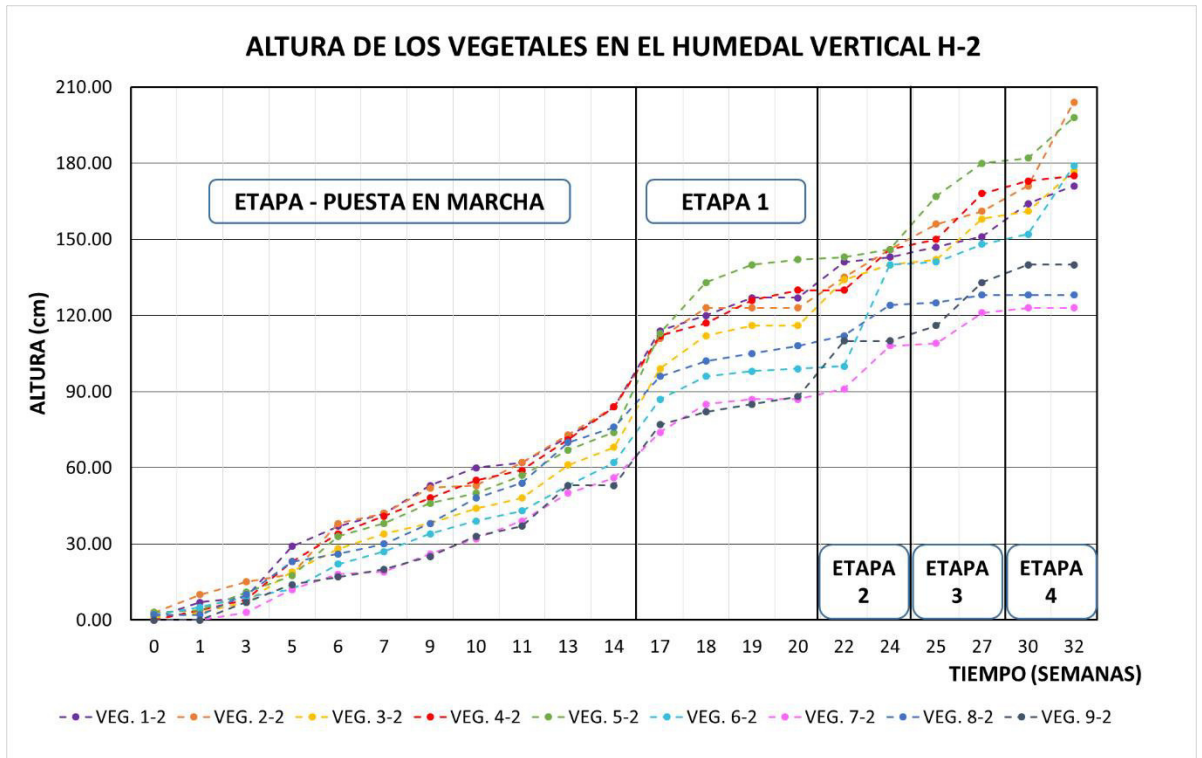


Gráfico 4-12 Altura de los vegetales sembrados en el humedal vertical H-2

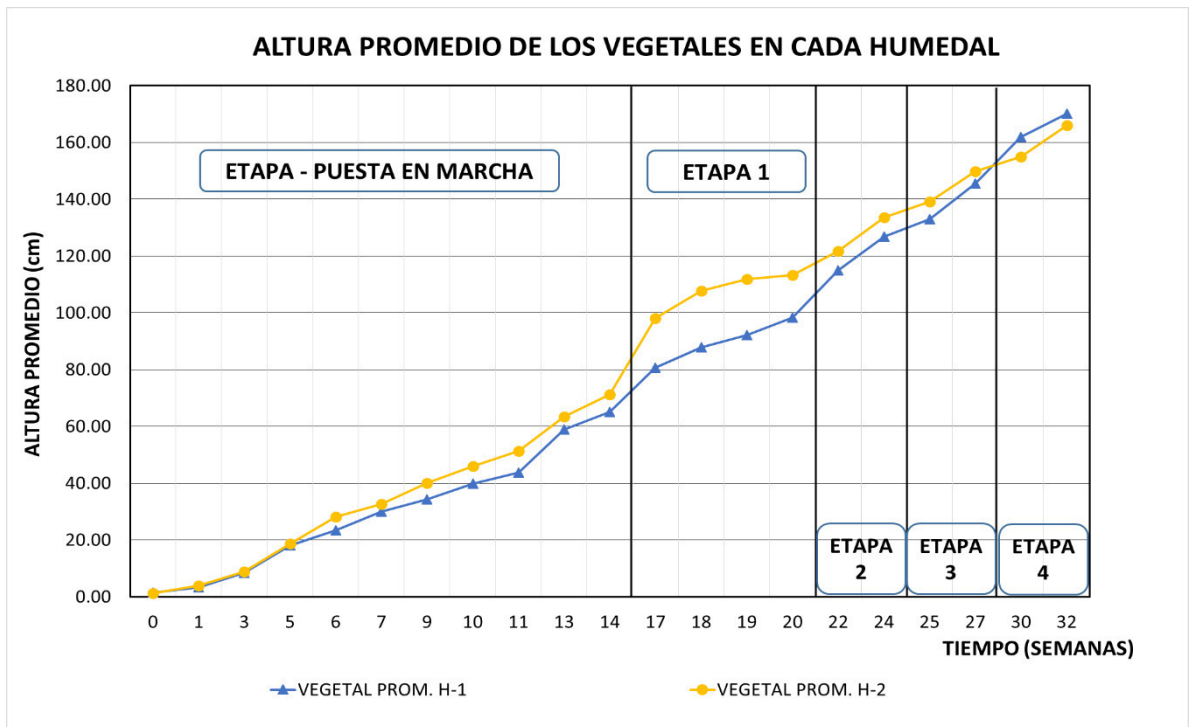


Gráfico 4-13 Altura promedio de los vegetales en cada humedal

Del Gráfico 4-11 se puede observar para el humedal vertical H-1 que durante el periodo de evaluación del sistema de investigación que la altura máxima fue de 2.01 metros registrada en el vegetal 4-1 y la altura mínima fue de 0.93 metros registrada en el vegetal 6-1.

Del Gráfico 4-12 se puede observar para el humedal vertical H-2 que durante el periodo de evaluación del sistema de investigación que la altura máxima fue de 2.04 metros registrada en el vegetal 2-2 y la altura mínima fue de 1.23 metros registrada en el vegetal 6-1.

Cabe mencionar, que la altura alcanzada por cada vegetal sembrado en el humedal H-1 y H-2 fue determinado solo durante el periodo de evaluación del sistema de investigación, cabiendo la posibilidad que los vegetales puedan seguir creciendo con el pasar del tiempo, esto se puede corroborar con lo investigado por (Gómez Lordan, 2017), donde el *Cyperus Alternifolios* llegó a tener una altura de 2.40m.

De igual manera del Gráfico 4-13 se tiene una altura promedio de los vegetales 1.70 metros y 1.66 metros para el humedal H-1 y H-2 respectivamente.

Asimismo los vegetales plantados en el humedal H-2 presentaron un mayor incremento de su altura en la etapa 1, esto posiblemente obedece a dos factores, como primer factor a las mayores temperaturas ambientales que se registraron en la etapa 1, lo cual se puede corroborar en el Gráfico 4-1 Temperatura Ambiental promedio en cada etapa de evaluación y como segundo factor a la mayor presencia de nutrientes (Gráfico 4-20 Nitrito y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación y Gráfico 4-21 Nitrato promedio en cada etapa de evaluación) que se evidenciaron en el humedal H-2 para la etapa 1.

Con los datos expresados en el Gráfico 4-11 y Gráfico 4-12 se procede a determinar la tasa de crecimiento promedio para cada vegetal en cada etapa de evaluación según se muestra en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 para el humedal vertical H-1 y H-2 respectivamente.

Tabla 4-3 Tasa de crecimiento promedio de los vegetales del humedal vertical H-1 en cada etapa de evaluación

ETAPA	VEGETALES SEMBRADOS EN EL HUMEDAL H-1								
	VEG. 1-1	VEG. 2-1	VEG. 3-1	VEG. 4-1	VEG. 5-1	VEG. 6-1	VEG. 7-1	VEG. 8-1	VEG. 9-1
ETAPA – PUESTA EN MARCHA	5.8	5.4	5.6	5.6	5.7	2.7	4.2	3.8	2.4
ETAPA 1	5.5	7.9	6.6	7.9	6.9	3.6	3.1	4.3	5.3
ETAPA 2	7.3	8.0	6.8	5.5	4.8	5.0	11.5	7.8	7.8
ETAPA 3	2.5	6.8	2.0	10.5	11.0	1.8	5.5	8.3	8.0
ETAPA 4	10.3	1.7	6.3	5.3	4.8	1.3	4.9	7.3	1.0

Tabla 4-4 Tasa de crecimiento promedio de los vegetales del humedal vertical H-2 en cada etapa de evaluación

ETAPA	VEGETALES SEMBRADOS EN EL HUMEDAL H-2								
	VEG. 1-1	VEG. 2-1	VEG. 3-1	VEG. 4-1	VEG. 5-1	VEG. 6-1	VEG. 7-1	VEG. 8-1	VEG. 9-1
ETAPA – PUESTA EN MARCHA	5.9	6.7	5.0	6.3	5.5	4.7	4.1	5.2	3.6
ETAPA 1	5.8	5.3	6.8	6.8	10.5	5.1	4.8	4.7	4.8
ETAPA 2	4.0	5.8	6.0	4.0	1.0	10.3	5.3	4.0	5.5
ETAPA 3	3.0	6.3	5.0	6.5	13.8	2.3	3.5	1.3	7.3
ETAPA 4	3.9	9.9	4.5	1.3	4.3	7.4	0.3	0.0	1.2

Con los valores obtenidos en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 se procede a determinar el promedio de las tasas de crecimiento de los vegetales por etapas de evaluación, obteniendo así la Tabla 4-5, el cual indica la tasa de crecimiento promedio de los vegetales de cada humedal en las etapas de evaluación.

Tabla 4-5 Tasa de crecimiento promedio del vegetal en cada etapa de evaluación para cada humedal

ETAPA	TASA DE CRECIMIENTO PROMEDIO (cm/sem)	
	H-1	H-2
ETAPA – PUESTA EN MARCHA	4.6	5.2
ETAPA 1	5.7	6.0
ETAPA 2	7.1	5.1
ETAPA 3	6.3	5.4
ETAPA 4	4.8	3.7

En la Tabla 4-5, se observa que la mayor tasa de crecimiento del vegetal para el humedal H-1 se presenta en la Etapa 2 con un valor de 7.1cm/sem

y para el humedal H-2 se presenta en la Etapa 1 cuyo valor es de 6.0cm/sem.

De acuerdo a lo descrito en el párrafo anterior, se puede observar que la tasa de crecimiento promedio del vegetal del humedal H-1 es mayor con respecto al del humedal H-2, probablemente esto fue causado por una mayor asimilación de nutrientes por parte de las raíces de los vegetales del humedal H-1, a consecuencia que el medio granular de este humedal estaba conformado por una mayor proporción de grava lo cual brindaba una mayor capacidad para el paso de agua residual, logrando asimilar de una manera más rápida los nutrientes, asimismo se pudo evidenciar que la altura promedio alcanzada por los vegetales del H-1 es mayor a la H-2, tal como lo indica el Gráfico 4-13.

En ambos humedales su tasa de crecimiento promedio del vegetal resulto ser mayor para las etapas 1 y 2, tal como lo indica la Tabla 4-5, debido a que estas etapas fueron evaluadas en la estación de verano, donde la temperatura ambiental es mayor y se presenta una mayor incidencia de luz solar, siendo estos factores muy beneficiosos para acelerar el crecimiento de los vegetales, caso contrario ocurre en las estaciones de otoño y primavera donde se evidencia una menor tasa de crecimiento promedio del vegetales para ambos humedales.

En cuanto a la distribución y al crecimiento de la biomasa de los vegetales se puede decir que el humedal H-1 muestra una mejor distribución y mayor números de tallos que el humedal H-2, tal como se evidencia en la Figura 4-5.

El mantenimiento de los vegetales se realizó de manera quincenal en la etapa 1 y 2, para la etapa 3 y 4 se tuvo que realizar dos veces por semana el acomodo de los tallos y cortar aquellos que se encontraban muertos; como consecuencia de la excesiva cantidad de tallos que crecieron en cada vegetal, lo cual originó dificultades para la operación de los sistemas, específicamente en las tuberías de distribución del agua residual sobre el medio granular de cada humedal.

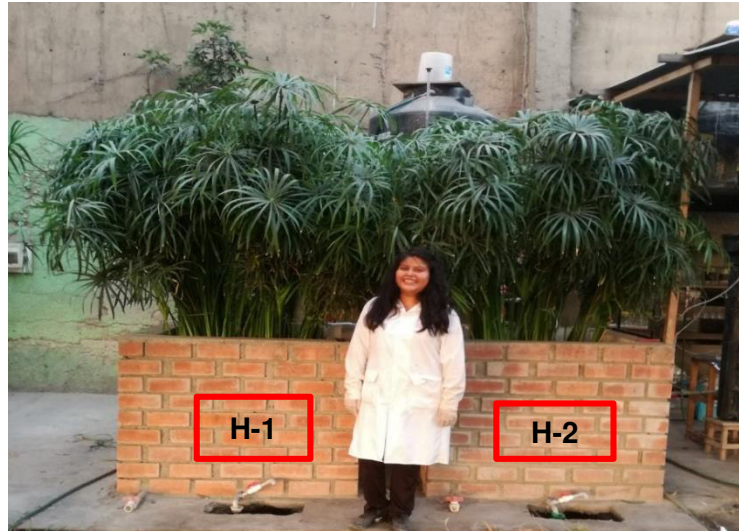


Figura 4-5 Vegetales al finalizar el proceso de evaluación del sistema

4.1.8.2. Raíces de los vegetales

El crecimiento de las raíces se realizó de manera vertical siguiendo el recorrido del agua residual, para poder observar el desarrollo de las mismas, se realizó un corte longitudinal del medio granular al finalizar el proceso de evaluación del sistema, la cual se puede visualizar en la Figura 4-6.



Figura 4-6 Corte longitudinal del medio granular del humedal

De acuerdo a la Figura 4-6 se puede observar que las raíces se han desarrollado de manera compacta en todo el medio granular, ofreciendo así una estabilidad del mismo, a la vez se identificó que las raíces encontradas en el sustrato de grava gruesa (piedra chancada) fueron más gruesas que las encontradas en el confitillo, y estas últimas más gruesas que las raíces encontradas en el sustrato de arena gruesa.

En la Figura 4-7, Figura 4-8 y Figura 4-9 se visualiza una muestra de la raíz en cada tipo de sustrato que compone el medio granular y también las imágenes de los mismos en el microscopio, las raíces encontradas son de un color marrón con filamentos plegados a ellos.

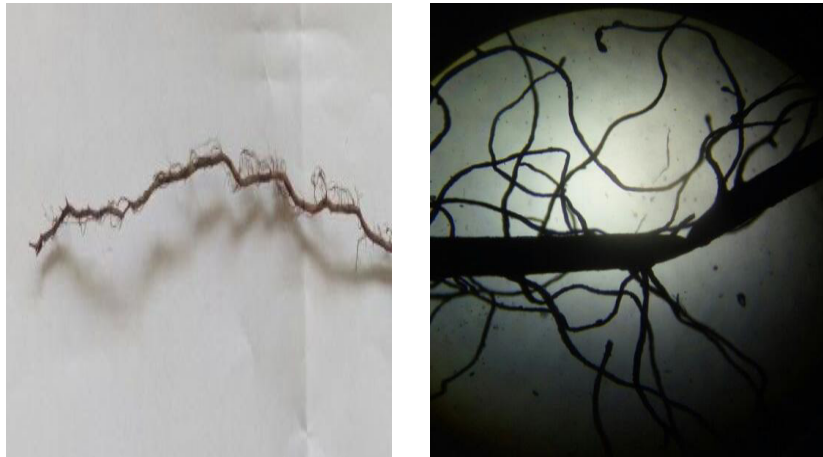


Figura 4-7 Vista en microscopio de la raíz en la arena gruesa



Figura 4-8 Vista en microscopio de la raíz en el confitillo



Figura 4-9 Vista en microscopio de la raíz en la grava

Se pudo encontrar que las raíces habían formado una malla gruesa en el fondo del humedal, inclusive algunas de ellas siguieron su recorrido por las paredes del humedal.



Figura 4-10 Formación de una malla gruesa de raíces en el fondo del humedal

La longitud aproximada de las raíces para el humedal H-1 fue de 1.50 metros y para el humedal H-2 fue de 1.60 metros, estas mediciones se realizaron en base a las raíces encontradas plegadas en las paredes laterales del humedal.

La diferencia de los grosores de las raíces en cada sustrato que compone el medio granular se debe mayormente a la resistencia que ofrece el sustrato para ser penetrado y a los espacios vacíos de los mismos; de acuerdo a los resultados obtenidos en el ítem 4.2.4 Nitrógeno Amoniacal y

4.2.6 Nitrato en el humedal H-2 se determinó una mayor concentración de nutrientes, esto sumado a las mejores condiciones de oxígeno disuelto y pH, probablemente favoreció a un mejor desarrollo del sistema radicular.

4.1.9. Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico se realizó una vez concluida la etapa 4 de evaluación, el procedimiento a seguir se encuentra detallado en el ítem ANEXO N° 3 – TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO, con los datos mostrados en la Tabla 8-4 Conductividad de los humedales H-1 y H-2 en el tiempo se procedió a realizar el Gráfico 4-14 y Gráfico 4-15 para el humedal vertical H-1 y H-2 respectivamente.

Del Gráfico 4-14 se determina que el efluente del humedal vertical H-1 alcanza su máxima concentración de conductividad de 14.63 mS/cm en un tiempo de 320 minutos, resultando este su tiempo de retención hidráulica real para la etapa 4 de evaluación en el cual se alimentaba a los humedales con un caudal de 7 ml/s y con una carga hidráulica de $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$.

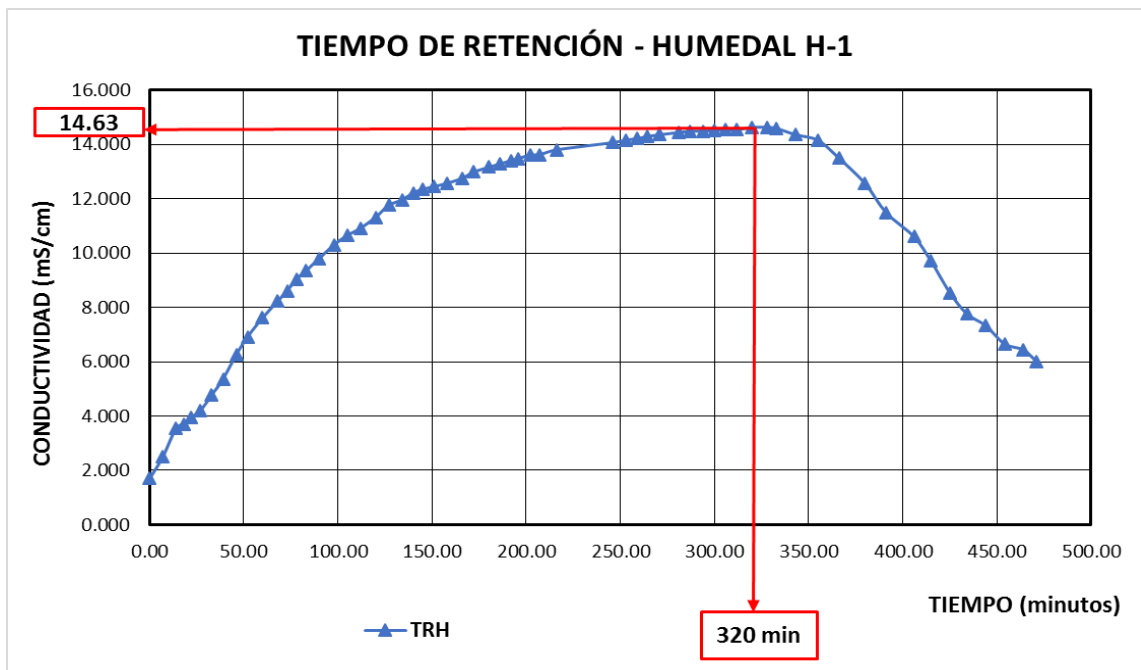


Gráfico 4-14 Tiempo de retención del humedal H-1

De la misma manera en el Gráfico 4-15 se determina que el efluente del humedal vertical H- alcanza su máxima concentración de conductividad de

14.59 mS/cm en un tiempo de 341 minutos, resultando este su tiempo de retención hidráulica real para la etapa 4 de evaluación en el cual se alimentaba a los humedales con un caudal de 7 ml/s y con una carga hidráulica de $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$.

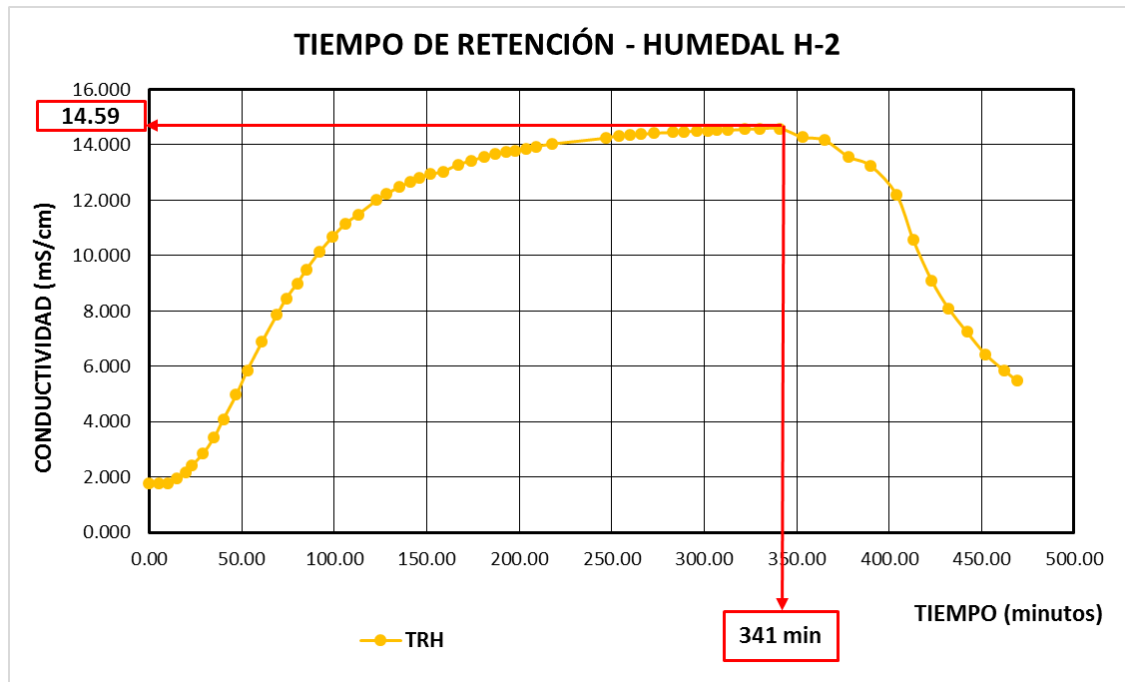


Gráfico 4-15 Tiempo de retención del humedal H-2

El TRH del humedal vertical H-2 es mayor en 21 minutos al TRH del humedal vertical H-1, esta diferencia probablemente se debe a la composición del medio granular del humedal H-2, como se detalló en el ítem 3.2.1 Diseño experimental del sistema, el humedal H-2 tiene un mayor porcentaje de finos (arena) en el medio granular, siendo su conductividad hidráulica menor que la conductividad hidráulica de la grava (mayor composición del medio granular del humedal vertical H-2), lo cual hace que el paso del agua residual a través de este humedal tarde más que el humedal vertical H-1.

La diferencia entre ambos tiempos de retención no es tan significativa debido a que en ambos humedales el sistema radicular de los vegetales plantados se desarrolló de manera efectiva durante el proceso de evaluación del sistema.

4.2. Análisis biológicos

4.2.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La demanda bioquímica de oxígeno en cada punto de monitoreo se midió semanalmente a partir de la semana 8 hasta la semana 32, cabe mencionar que no se realizaron mediciones de DBO₅ entre la semana 12 al 16 debido a una insuficiencia de insumos químicos de la tesista por esas semanas, asimismo las semanas 12 al 16 pertenecen a la etapa puesta en marcha.

Según el Gráfico 4-16 se tiene para el punto EH-1 y EH-2 una variación de la eficiencia de reducción promedio conforme se evaluó cada carga hidráulica, por ello para el punto EH-1 se obtuvo una eficiencia de reducción para la etapa – puesta en marcha de 91.38%, en la etapa 1 se evidenció un aumento a 95.26%, y para la etapa 2, 3 y 4 los rendimientos fueron disminuyendo resultando así para la etapa 4 un rendimiento de 89.43%. Del mismo modo para el punto EH-2 se obtuvo una eficiencia de reducción en la etapa – puesta en marcha de 93.34%, en la etapa 1 se evidenció un aumento de esta a 97.35%, luego en la etapa 2 descendió la eficiencia a 94.23%, para luego en la etapa 3 volver a aumentar y por último vuelve a descender en la etapa 4 a un valor promedio de 91.23%.

Como se explicó en el ítem 3.2.2 Cronograma de desarrollo, las cargas hidráulicas se evaluaron de manera ascendente, donde la etapa – puesta en marcha tuvo una duración de 16 semanas, mientras las etapas 1 al 4 tuvieron una duración de 4 semanas cada una, donde a consecuencia de aumentar la carga hidráulica se aumentó el caudal de ingreso y la carga orgánica superficial hacia cada humedal y se produjo una disminución del tiempo de retención hidráulico en cada etapa.

Teniendo en cuenta lo explicado en el párrafo anterior, se puede decir para el humedal H-1 que la variación de la carga hidráulica a partir de la etapa 2 disminuye la eficiencia de reducción de materia orgánica medida como DBO₅, debido al menor tiempo de retención hidráulica de las etapas 2, 3 y 4, lo cual ocasiona un menor tiempo de contacto entre los microorganismos, la materia orgánica y oxígeno disuelto en el medio granular y las raíces de los vegetales.

Para el humedal H-2 se puede explicar el mismo comportamiento, con la salvedad que en la etapa 3 se evidencia un aumento de la eficiencia de reducción con respecto a la etapa 2, esto probablemente se debió a dos razones, la primera razón es que al aumentar el caudal de ingreso hacia humedal se ocasiona un mayor arrastre de la materia orgánica particulada disponible en el agua residual y medio granular lo cual ocasiona que los espacios intersticiales del medio granular queden libres para unas próximas evaluaciones, pero ante un nuevo aumento de la carga hidráulica el humedal vuelve a disminuir su eficiencia como se evidencia en la etapa 4, la segunda razón obedece al tiempo de duración de las etapas del 1 al 4, debido ante un cambio de la carga hidráulica se necesita un periodo de estabilización para los humedales, probablemente el tiempo de estabilización para estas etapas de evaluación fue corto lo cual se evidencia en el comportamiento variable del humedal H-2. Cabe recalcar que la etapa – puesta en marcha y etapa 1 funcionó para una misma carga hidráulica, el aumento de la eficiencia de reducción para la etapa 1 es predecible debido a un mayor desarrollo de la biopelícula y las mejores condiciones del medio ambiental y del agua residual con respecto a la etapa – puesta en marcha.

Con respecto a la variable de la composición del medio granular de cada humedal, se tiene en el Gráfico 4-16 que la eficiencia de reducción promedio de la materia orgánica medida como DBO_5 del humedal H-2 es mayor al del Humedal H-1 en todas las etapas de evaluación, esto es debió a la composición del medio granular del H-2 la cual tienen un mayor porcentaje de finos (arena gruesa) y presenta un mejor desarrollo del sistema radicular de las plantas lo cual brinda una mayor área superficial disponible para que los microorganismos puedan desarrollar las biopelículas y con ello poder remover la materia orgánica con un mayor eficiencia. Para ambos humedales tenemos que en la etapa 1 evaluada para una carga hidráulica de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ se obtuvo las mayores eficiencias de reducción, siendo sus valores de 95.26% y 97.35% para los humedales H-1 y H-2 respectivamente, también debemos mencionar que las mejores condiciones externas se presentaron en esta etapa lo cual permite obtener estos rendimientos.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones realizadas en años anteriores tenemos; Bohórquez Bedoya en el 2015 obtuvo una eficiencia de reducción mayor a 47% para humedales basados unicamente en grava, y una eficiencia de reducción mayor a 96% para humedales basados en arena unicamente, para una carga hidraulica similar a la de la etapa 1; por otro lado Torbisco Saenz en el año 2017 obtuvo para un humedal de similares características del humedal H-2 una eficiencia de reducción del 96.23% donde el vegetal sembrado fue el *Chrysopogon Zizanioides* (vetiver) y por ultimo Gómez Lordan (2017) encontro una eficiencia de reducción de 98.6% para un humedal sembrado con *Cyperus Alternifolius* similar al humedal H-2.

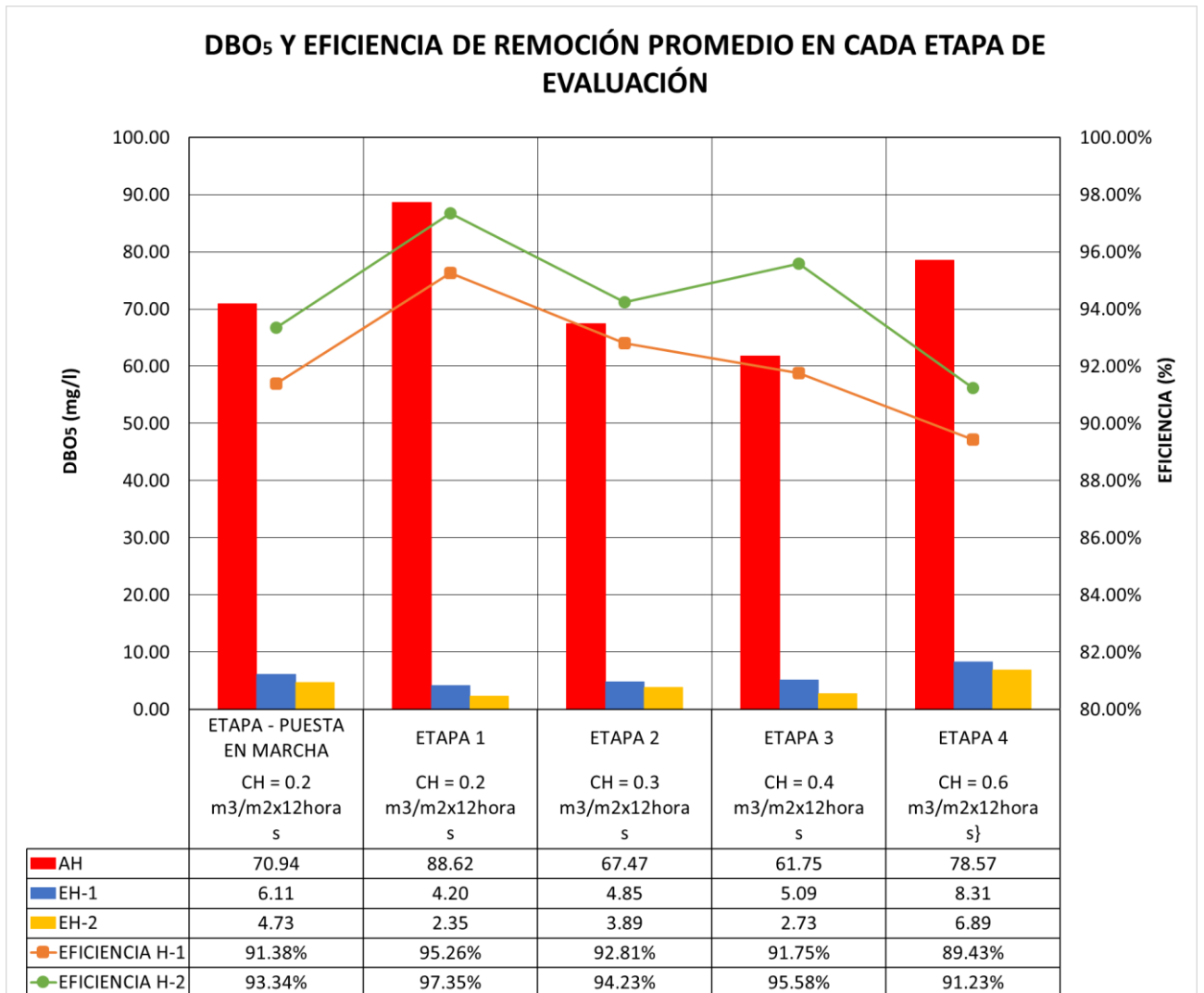


Gráfico 4-16 DBO₅ y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación

4.2.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno en cada punto de monitoreo se midió semanalmente a partir de la semana 4 hasta la semana 32, cabe mencionar que no se realizaron mediciones de DQO entre la semana 12 al 16 debido a la insuficiencia de insumos químicos por esas semanas.

Según el Gráfico 4-17 tenemos para el punto EH-1 y EH-2 una variación de la eficiencia de reducción conforme se evaluó cada carga hidráulica, por ello se obtuvo una eficiencia de reducción en la etapa – puesta en marcha de 79.90% y 82.68%, en la etapa 1 se evidenció un aumento de esta a 81.49% y 86.61%, luego en la etapa 2 descendió la eficiencia a 73.55% y 76.52%, para luego en la etapa 3 volver a aumentar y por último vuelve a descender en la etapa 4 a un valor promedio de 71.96% y 74.59 para los efluentes del humedal H-1 y H-2 respectivamente. Cabe recalcar que la etapa – puesta en marcha y etapa 1 operó para una misma carga hidráulica, el aumento de la eficiencia de reducción para la etapa 1 es predecible debido a las mejores condiciones del medio granular, del medio ambiental y del agua residual con respecto a la etapa – puesta en marcha; asimismo se evidenció un aumento de la eficiencia de reducción de la etapa 3 con respecto a la etapa 2, similar al comportamiento detallado en el ítem 4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).

Con respecto a la variable de la composición del medio granular de cada humedal, se tiene en el Gráfico 4-17 que la eficiencia de reducción promedio de la DQO del humedal H-2 es mayor al del Humedal H-1 en todas las etapas de evaluación, para ambos humedales tenemos que en la etapa 1 evaluada para una carga hidráulica de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ se obtuvo las mayores eficiencias de reducción, siendo sus valores de 81.49% y 86.61% para los humedales H-1 y H-2 respectivamente.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones realizadas en años anteriores tenemos; Rodríguez et al. (2012) encontró una eficiencia de reducción de 81% para un humedal de similares características al humedal H-1;

Bohórquez Bedoya en el 2015 obtuvo una eficiencia de reducción mayor a 39% para humedales basados unicamente en grava, y una eficiencia de reducción mayor a 91% para humedales basados en arena unicamente, para una carga hidraulica similar a la de la etapa 1; por otro lado Torbisco Saenz en el año 2017 obtuvo para un humedal de similares características del humedal H-2 una eficiencia de reducción del 90.63% donde el vegetal sembrado fue el *Chrysopogon Zizanioides* (vetiver) y por ultimo Gómez Lordan (2017) encontro una eficiencia de reducción de 93% para un humedal sembrado con *Cyperus Alternifolius* similar al humedal H-2.

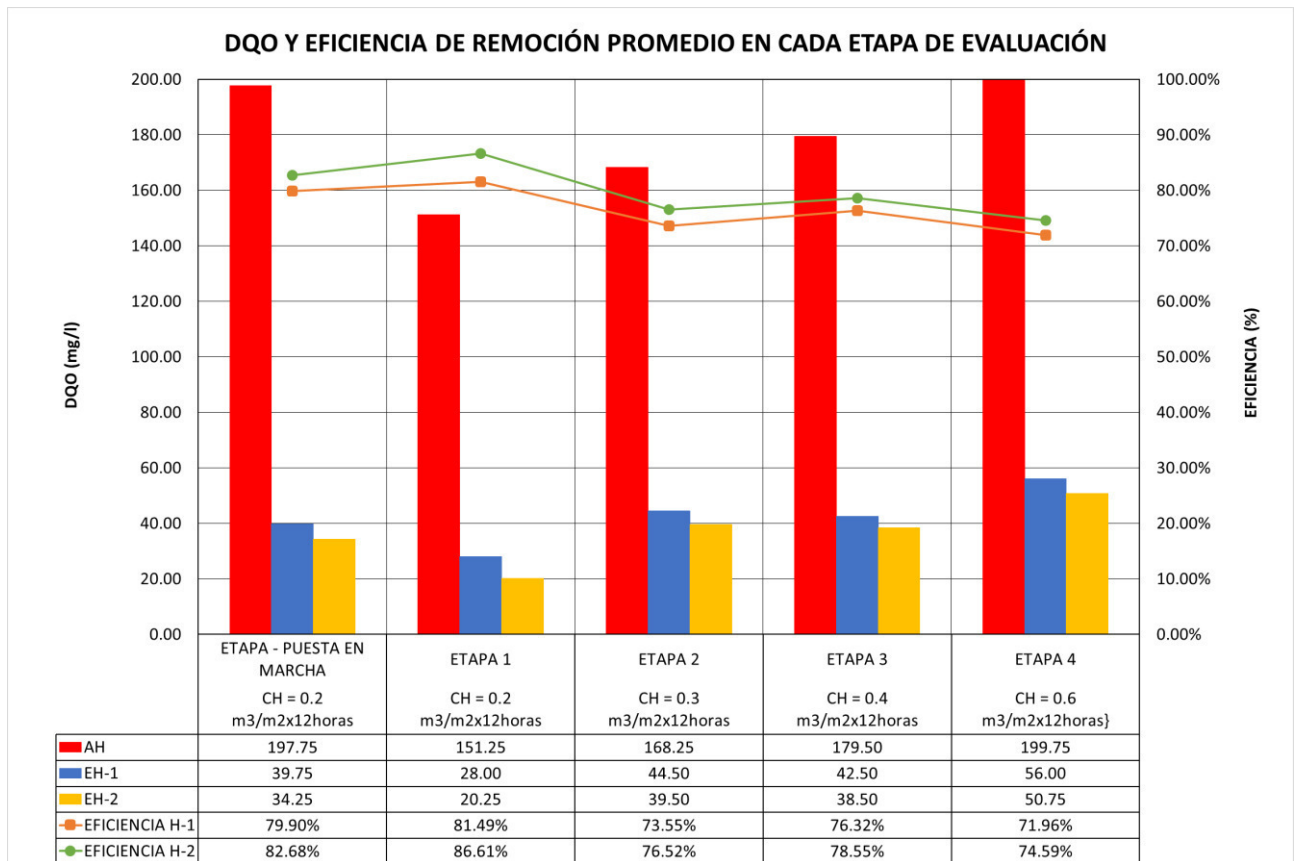


Gráfico 4-17 DQO y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación

4.2.3. Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales en cada punto de monitoreo se midieron semanalmente a partir de la semana 8 hasta la semana 32, cabe mencionar que no se realizaron mediciones de SST entre la semana 12 al 16 debido a

una insuficiencia de insumos químicos de la tesista por esas semanas, asimismo las semanas 12 al 16 pertenecen a la etapa puesta en marcha.

Según el Gráfico 4-18 tenemos para el punto EH-1 y EH-2 una variación de la eficiencia de reducción conforme se evaluó cada carga hidráulica, por ello se obtuvo una eficiencia de reducción en la etapa - puesta en marcha de 78.67% y 79.27%, en la etapa 1 se evidenció un aumento para luego mantenerse casi constante durante las etapas 2 y 3 con una variación de 84.31% - 84.19% y 88.56% - 87.91% y por último desciende en la etapa 4 a un valor promedio de 57.26% y 61.67% para los efluentes del humedal H-1 y H-2 respectivamente.

Como sabemos la reducción de los SST es ocasionado por la filtración que se origina en el medio granular del humedal a consecuencia de la baja velocidad de circulación del agua residual a través de esta, la cual se ve relacionado con la carga hidráulica a aplicar y la presencia de las raíces de las plantas, esta materia suspendida que quedó retenida en los espacios intersticiales luego será asimilada y sintetizada por los microorganismos que se desarrollan en el medio granular.

Teniendo en cuenta lo explicado en el párrafo anterior, podemos decir que entre la etapa – puesta en marcha y etapa 1 aumentó la eficiencia de reducción, debido a que la concentración promedio de SST en el afluente de la etapa 1 fue menor respecto a la etapa – puesta de marcha y funcionaron para una misma carga hidráulica; para las etapas 2 y 3 se mantiene casi constante la eficiencia de reducción con respecto a etapa 1, probablemente esto se debió a que durante estas etapas las raíces se encontraban en constante crecimiento lo cual fue originando que se disminuya aún más la velocidad de circulación del agua residual contrarrestando el aumento de la carga hidráulica durante estas etapas, ya para la etapa 4 es notable el descenso de la eficiencia de reducción, debido a los menores tiempo de retención y aun mayor arrastre de las partículas suspendidas.

Con respecto a la variable de la composición del medio granular de cada humedal, se tiene en el Gráfico 4-18 que la eficiencia de reducción promedio de los SST del humedal H-2 es mayor al del Humedal H-1 en todas las etapas

de evaluación, esto se debió a la composición del medio granular del H-2 la cual tienen un mayor porcentaje de finos (arena gruesa) y presenta un mejor desarrollo del sistema radicular de las plantas lo cual brinda menores velocidades de circulación del agua residual y una menor porosidad aumentando así la capacidad de retener los SST en el medio granular. Para ambos humedales tenemos que en la etapa 1 evaluada para una carga hidráulica de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ se obtuvo las mayores eficiencias de reducción, siendo sus valores de 84.31% y 88.56% para los humedales H-1 y H-2 respectivamente.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones realizadas en años anteriores tenemos; Bohórquez Bedoya en el 2015 obtuvo una eficiencia de reducción mayor a 85% para humedales basados en arena únicamente, para una carga hidráulica similar a la de la etapa 1; por otro lado Torbisco Saenz en el año 2017 obtuvo para un humedal de similares características del humedal H-2 una eficiencia de reducción del 87.18% donde el vegetal sembrado fue el *Chrysopogon Zizanioides* (vetiver) y por último Gómez Lordan (2017) encontró una eficiencia de reducción de 89.1% para un humedal sembrado con *Cyperus Alternifolius* similar al humedal H-2.

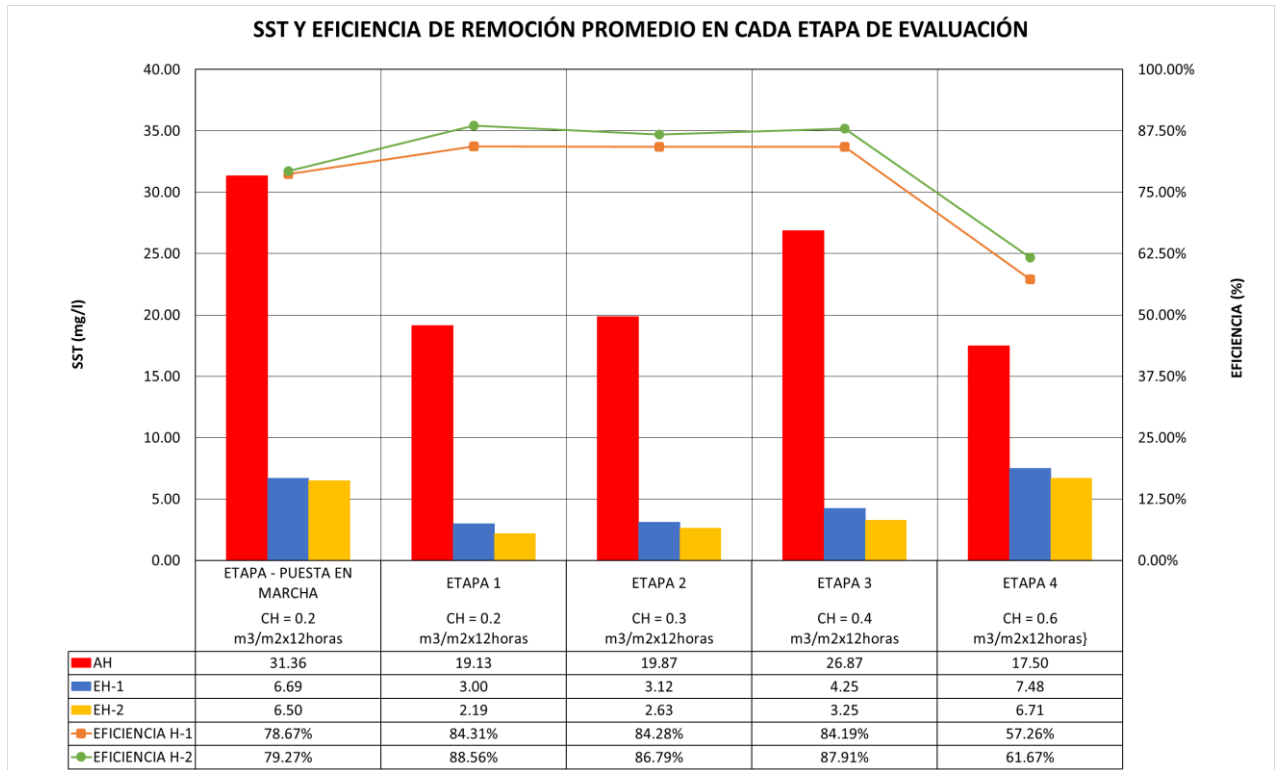


Gráfico 4-18 Sólidos Suspendedos Totales y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación

4.2.4. Nitrógeno Amoniacal

En el Gráfico 4-19 tenemos para el punto EH-1 y EH-2 una variación de la eficiencia de reducción promedio conforme se evaluó cada carga hidráulica, por ello se obtuvo una eficiencia de reducción en la etapa 1 de 90.55% y 96.06%, en la etapa 2 se evidenció una ligera disminución de 1.31% y 1.76% resultado valores de eficiencia de 89.24% y 94.30% y por último en las etapas 3 y 4 se encontró una disminución significativa de la eficiencia de reducción llegando a tener valores promedio de 66.67% y 67.82% (etapa 4) para los efluentes del humedal H-1 y H-2 respectivamente.

Asimismo, en el Gráfico 4-19 se puede observar para los humedales H-1 y H-2 que conforme se evaluaron las distintas cargas hidráulicas la eficiencia de reducción del nitrógeno amoniacal fue disminuyendo; entre las etapas 1 y 2 la diferencia de reducción no fue significativa, el factor incidente para la disminución de la eficiencia de reducción del nitrógeno amoniacal fue el pH y

probablemente la alcalinidad del agua residual (parámetro no medido), para la etapa 1 se alcanzó un pH promedio de 7.24 mientras y para la etapa 2 un pH promedio de 7.15, a pesar que el oxígeno disuelto de la etapa 2 es superior a la etapa 1, lo mismo que corrobora lo mencionado por Vymazal, 2007; el cual indica que los principales factores que inciden en la eficiencia de reducción del nitrógeno amoniacal tenemos al pH, la alcalinidad, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto, la fuente carbono inorgánico y la población microbiana de las bacterias autótrofas.

Por otro lado, para la etapa 3 y 4 la eficiencia de reducción del nitrógeno amoniacal disminuyó de manera significativa, de acuerdo a revisiones bibliográficas se sabe que una disminución del OD y un aumento de la carga orgánica (a consecuencia del aumento de la carga hidráulica), hace que los procesos de nitrificación disminuyan notablemente, debido a un crecimiento predominante de las bacterias heterótrofas ante las bacterias autótrofas (responsables de la nitrificación), asimismo el proceso de nitrificación se ve afectado por la disminución del pH y temperatura para las etapas 3 y 4.

Con respecto a la variable de la composición del medio granular de cada humedal, se tiene en el Gráfico 4-19 que la eficiencia de reducción promedio del nitrógeno amoniacal del humedal H-2 es mayor al del Humedal H-1 en todas las etapas de evaluación, esto se debió a la composición del medio granular del H-2 la cual tienen un mayor porcentaje de finos (arena gruesa) y presenta un mejor desarrollo del sistema radicular de las plantas lo cual brinda una mayor área superficial disponible para que las bacterias autótrofas desarrollen las biopelículas y puedan oxidar y sintetizar el nitrógeno amoniacal, como se mencionó en el ítem 4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) el humedal H-2 presenta mejores eficiencias de reducción de la materia orgánica medida como DBO₅, lo cual permite que las bacterias autótrofas puedan desarrollarse de manera más acelerada compitiendo así por O.D. disponible, a ello también se le suma las mejores condiciones de los factores que inciden en el proceso de la nitrificación para el humedal H-2, lo cual se evidencia en una mayor concentración de OD, un pH mucho menor en el efluente y una mayor producción de nitratos como se mencionara en el ítem 4.2.6 Nitrato. Para ambos humedales tenemos que en la etapa 1

evaluada para una carga hidráulica de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ se obtuvo las mayores eficiencias de reducción, siendo sus valores de 90.55% y 96.06% para los humedales H-1 y H-2 respectivamente.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones realizadas en años anteriores tenemos; Rodríguez et al. (2012) encontró una eficiencia de reducción de 74.36% para un humedal de similares características al humedal H-1; Bohórquez Bedoya en el 2015 obtuvo una eficiencia de reducción mayor a 42% para humedales basados únicamente en grava, y una eficiencia de reducción mayor a 83% para humedales basados en arena únicamente, para una carga hidráulica similar a la de la etapa 1 y por último Gómez Lordan (2017) encontró una eficiencia de reducción de 98.2% para un humedal sembrado con *Cyperus Alternifolius* similar al humedal H-2.

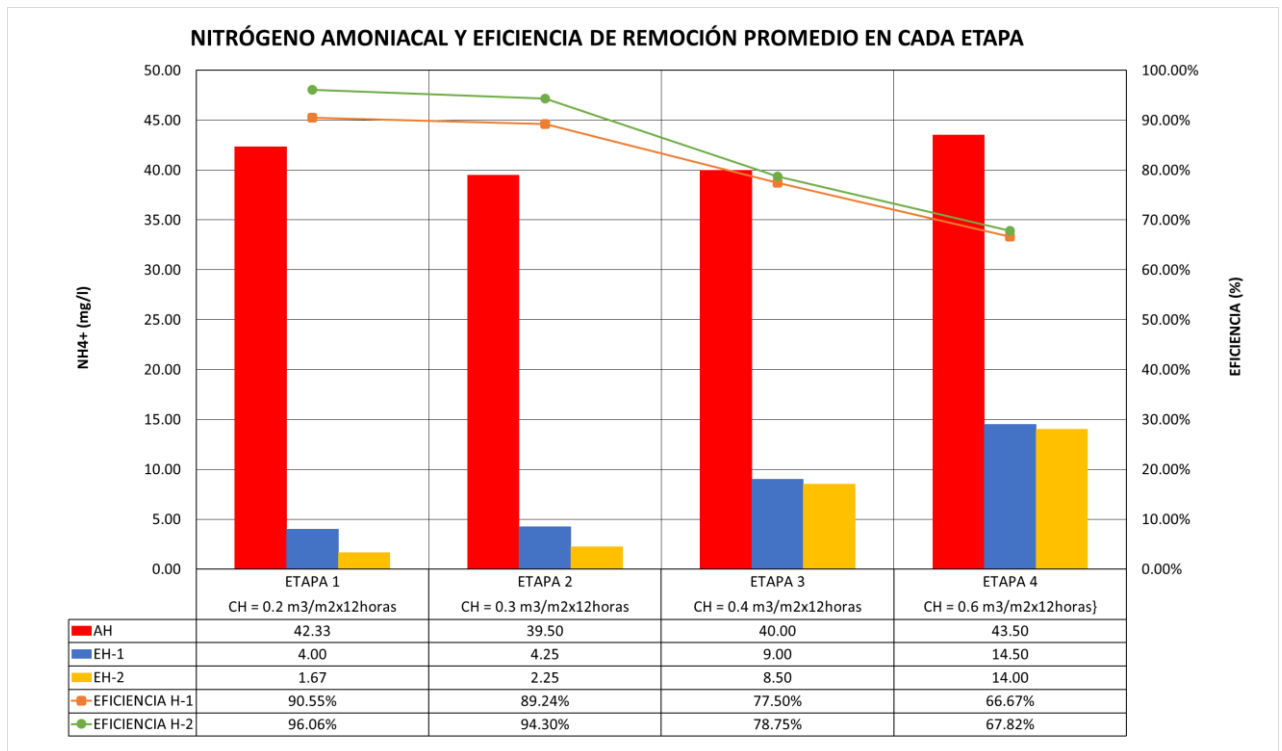


Gráfico 4-19 Nitrogeno Amoniacal y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación

4.2.5. Nitrito

En el Gráfico 4-20 tenemos para el punto EH-1 y EH-2 una variación de la eficiencia de reducción promedio conforme se evaluó cada carga hidráulica,

por ello se obtuvo una eficiencia de reducción en la etapa 1 de 81.37% y 90.97%, en la etapa 2 se evidenció un aumento de 11.50% y 4.51% resultado valores de eficiencia de 92.87% y 95.48% y por último en las etapas 3 y 4 se encontró un ligero aumento de la eficiencia de reducción llegando a tener valores promedio de 96.98% y 97.00% (etapa 4) para los efluentes del humedal H-1 y H-2 respectivamente.

Asimismo, del Gráfico 4-20 se puede decir para el humedal H-1 y H-2 que conforme se evaluaron las distintas cargas hidráulicas la eficiencia de reducción del nitrito fue aumentando, se sabe que el nitrito removido es el resultante de la concentración del afluente más lo producido en la primera fase de la nitrificación, en tal caso al verse todas las condiciones necesarias para poder remover el nitrito, tanto como el oxígeno disuelto, pH y las bacterias autótrofas del género nitrobacter, pues la eficiencia de reducción del nitrito fue en aumento, a pesar que la eficiencia de reducción del nitrógeno amoniacal descendió de manera significativa en las etapas 3 y 4, pero para contrarrestar ello el afluente aumento su concentración de nitrito; con ello se corrobora que en el humedal H-1 y H-2 se ha realizado de manera satisfactoria la primera fase del proceso de nitrificación (conversión de amonio a nitrito).

Con respecto a la variable de la composición del medio granular de cada humedal, se tiene en el Gráfico 4-20 que la eficiencia de reducción promedio del nitrito del humedal H-2 es mayor al del Humedal H-1 en todas las etapas de evaluación, esto se debió a la composición del medio granular del H-2 la cual tienen un mayor porcentaje de finos (arena gruesa), tal como se explicó en el ítem de 4.2.4 Nitrógeno Amoniacal. Para ambos humedales tenemos que en la etapa 4 evaluada para una carga hidráulica de $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ se obtuvo las mayores eficiencias de reducción, siendo sus valores de 96.98% y 97.00% para los humedales H-1 y H-2 respectivamente.

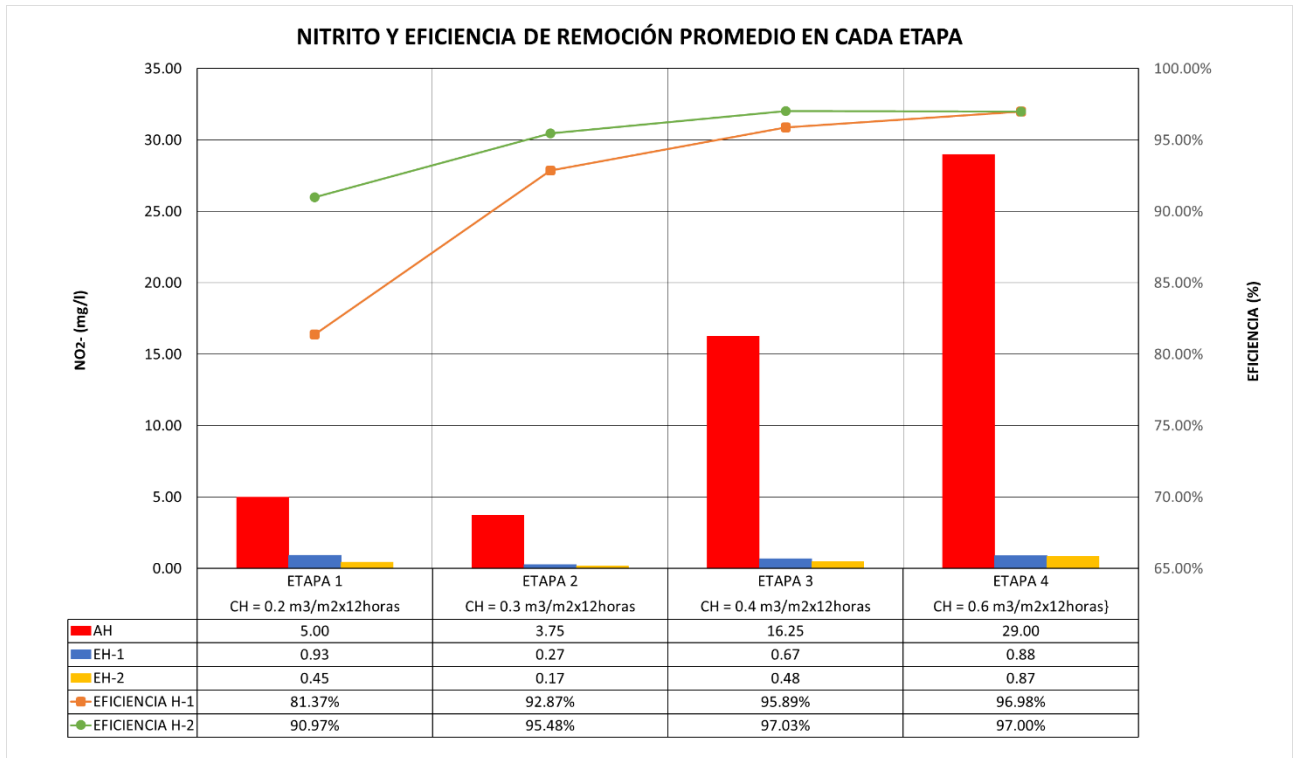


Gráfico 4-20 Nitrito y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación

4.2.6. Nitrato

En el Gráfico 4-21 se muestra la concentración promedio de nitratos para cada punto de monitoreo; del cual podemos evidenciar un aumento de la concentración de nitratos entre el punto AH y el efluente del humedal H-1 de 19.53, 16.60, 12.68 y 11.80; y con el efluente del humedal H-2 de 30.90, 21.63, 19.90, 11.85 para las etapas 1, 2, 3 y 4, esto se debió a la segunda fase (nitratación) del proceso de nitrificación, la cual consiste en la conversión biológica del nitrito hacia nitrato, lo cual corrobora que en los humedales de flujo subsuperficial vertical predomina los procesos de nitrificación sobre el proceso biológico de la desnitrificación.

Asimismo, podemos observar que el aumento de la concentración de nitratos fue disminuyendo conforme se aumentó la carga hidráulica, probablemente esto se debió a dos motivos, el primero es ante una disminución de la eficiencia de reducción de nitrógeno amoniacal a través del proceso de la nitrificación, pues en consecuencia se tendrá una menor producción de

nitratos y el otro motivo puede deberse a que parte del nitrato producido fue removido por los procesos de desnitrificación que en ciertas zonas del humedal puedan haberse desarrollado.

Con respecto a la variable de la composición del medio granular de cada humedal, se tiene en el Gráfico 4-21 que en el humedal H-2 se evidencia mayores concentraciones de nitratos en todas las etapas de evaluación, como consecuencia del proceso de la nitrificación, que tienen a desarrollarse de manera más eficiente en el humedal H-2. Además, podemos decir que la mayor concentración de nitratos para ambos humedales se evidencia en la etapa 1 siendo sus valores de 30.83 y 42.20 para los humedales H-1 y H-2 respectivamente.

Como consecuencia de las altas concentraciones de nitrato presente en los efluentes de los humedales H-1 y H-2, no se recomienda verter directamente a un cuerpo receptor, ya que esto podría generar la eutrofización (crecimiento excesivo de las plantas); pero si es recomendable su uso para el riego de vegetales de tallo alto.

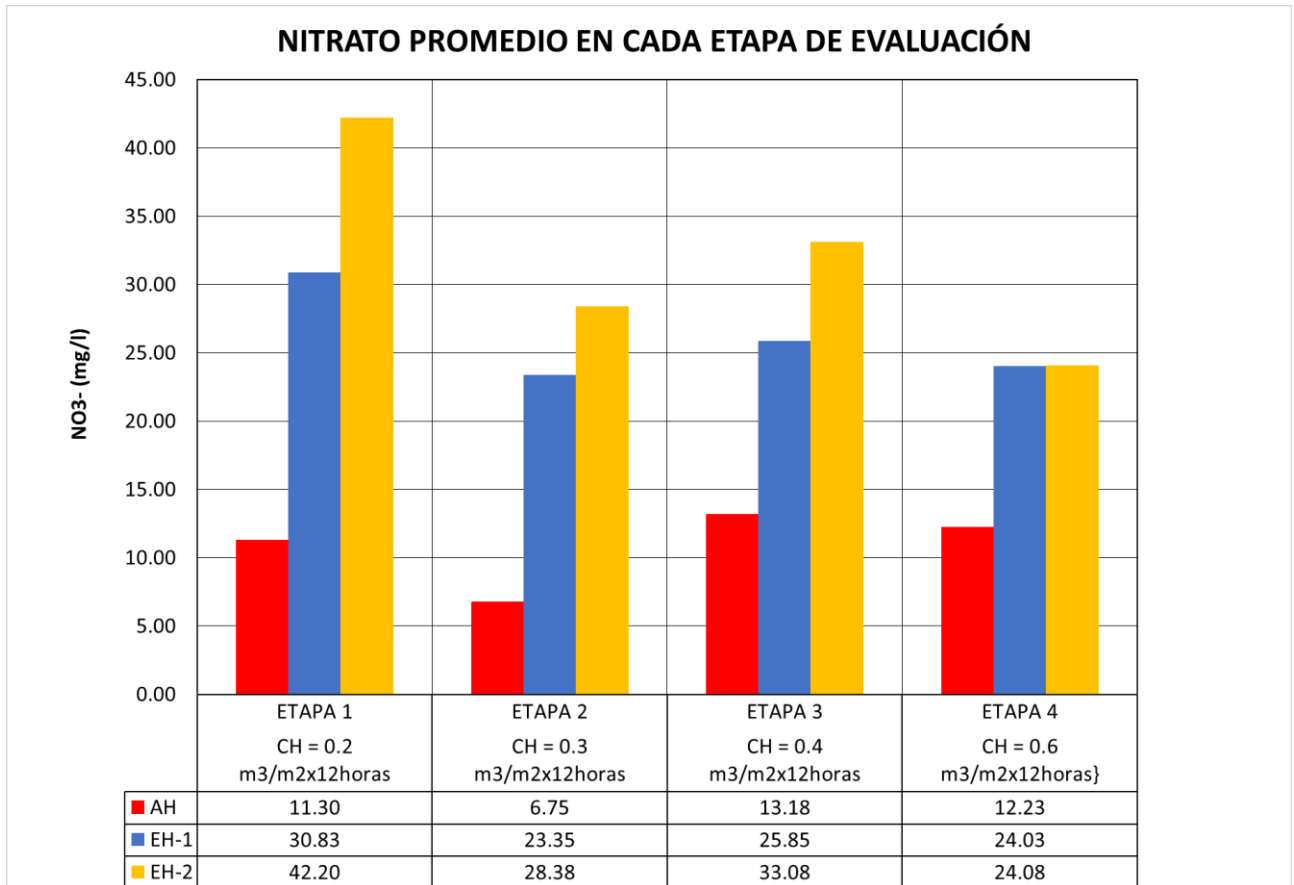


Gráfico 4-21 Nitrato promedio en cada etapa de evaluación

4.2.7. Nitrógeno Total

El nitrógeno total en cada punto de monitoreo se midió en las etapas 1 al 4, se realizaron entre 2 a 3 mediciones en cada etapa, esta decisión se tomó a consecuencia que no se contaba con los reactivos suficientes para realizar la medición cada semana según corresponde, debido a que restringió la venta de reactivos para medir nitrógeno total en el país.

En el Gráfico 4-22 tenemos un rango de eficiencia de reducción del nitrógeno total de 13.94% - 27.00% y 12.12% - 25.40% y una eficiencia promedio de todas las evaluaciones de 19.46% y 17.38% para el humedal H-1 y H-2 respectivamente en ambos casos, esta reducción se debió a la asimilación del nitrógeno total por parte de las plantas; estos porcentajes de reducción se encuentran dentro de los recomendados por García & Corzo, 2008 y Brix, 1994, el cual varía entre el 10 – 20% del nitrógeno total.

El comportamiento de las eficiencias de reducción promedio del nitrógeno total no fue estable en cuanto se evaluaron las distintas cargas hidráulicas, podemos observar del Gráfico 4-22 que entre las etapas 1 y 2 se evidenció un aumento de la eficiencia, luego para la etapa 3 un descenso y por último un ligero aumento de la misma, posiblemente esto obedezca a que hubo un retorno del nitrógeno asimilado por parte de las plantas hacia el agua residual ante la muerte de algunas partes aéreas del vegetal, por ello se recomienda podar la vegetación antes de la senescencia.

Las diferencias de reducción del nitrógeno total entre el humedal H-1 y H-2 para cada carga hidráulica evaluada no fue significativa, en promedio tuvieron eficiencia de reducción similares, siendo la eficiencia del humedal H-1 ligeramente superior a la del H-2, esto probablemente se debió a dos motivos, el primero a que el humedal H-1 presentó un mejor desarrollo de la biomasa de las plantas a través de una mejor asimilación de los nutrientes y el segundo motivo obedece a una menor producción de nitratos en el humedal H-1, teniendo así para ambos casos que la mejor eficiencia de reducción de nitrógeno total se dio en la etapa 2 evaluada para una carga hidráulica de $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ cuyos valores en promedio son para el punto EH-1 de 27.00% y para el punto EH-2 de 25.40%.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones realizadas en años anteriores tenemos; Bohórquez Bedoya en el 2015 obtuvo una eficiencia de reducción mayor a 20% para humedales basados únicamente en grava, y una eficiencia de reducción mayor a 20% para humedales basados en arena únicamente, para una carga hidráulica similar a la de la etapa 1; por otro lado Torbisco Saenz en el año 2017 obtuvo para un humedal de similares características del humedal H-2 y una carga hidráulica de $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$ una eficiencia de reducción del 21.66% donde el vegetal sembrado fue el *Chrysopogon Zizanioides* (vetiver) y por último Gómez Lordan (2017) encontró una eficiencia de reducción de 48.2% para un humedal sembrado con *Cyperus Alternifolius* similar al humedal H-2.

Con lo descrito en los párrafos precedentes, se corrobora que los humedales de flujo vertical no son sistemas eficientes para remover nitrógeno total (Vymazal, 2007), en este tipo de sistemas predomina el proceso de nitrificación el cual es considerado un mecanismo de transformación de nitrógeno amoniacal a nitratos, es decir que es eficiente para remover nitrógeno amoniacal, pero tienen poca eficiencia para remover nitratos e incluso aumentan sustancialmente su concentración en el efluente, tal como lo describimos en el ítem 4.2.6 Nitrato.

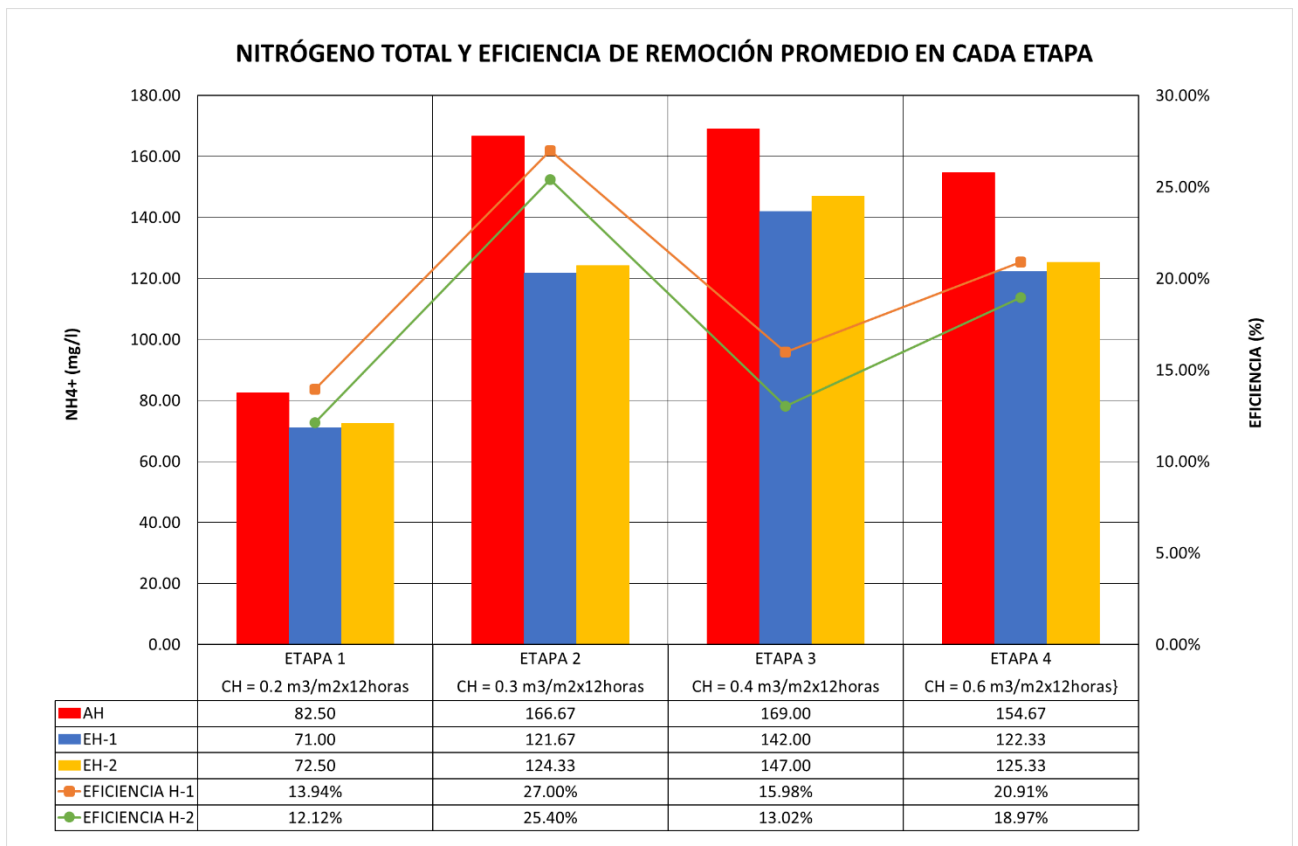


Gráfico 4-22 Nitrógeno Total y su eficiencia de reducción promedio en cada etapa de evaluación

4.2.8. Fósforo Total

El fósforo total en cada punto de monitoreo se midió en las etapas 1 al 4, solo se realizó una medición por etapa, generalmente en la última semana de evaluación de cada etapa.

En el Gráfico 4-23 tenemos un rango de eficiencia de reducción del fósforo total de 21.38% - 23.46% y 16.11% - 20.37% y una eficiencia promedio de todas las evaluaciones de 21.74% y 18.43% para el humedal H-1 y H-2 respectivamente en ambos casos, esto probablemente se debió a la asimilación de las plantas y microorganismos y la absorción del medio granular; estos porcentajes de reducción se encuentran dentro de los recomendados por García & Corzo, 2008, el cual varía entre el 10 – 20% del nitrógeno total.

Asimismo, del Gráfico 4-23 podemos observar que la eficiencia de reducción aumenta entre la etapa 1 y 2, luego comienza a descender durante las etapas 3 y 4, este descenso de la eficiencia de reducción probablemente se debió a que el medio granular de ambos humedales fue perdiendo su capacidad de adsorción; teniendo así para la etapa 2 la mayor eficiencia de reducción de coliformes termotolerantes, siendo sus valores de 23.46% y 20.37% para el humedal H-1 y H-2 respectivamente.

Las diferencias de reducción del fósforo total entre el humedal H-1 y H-2 para cada carga hidráulica evaluada no fue significativa, siendo la eficiencia del humedal H-1 ligeramente superior a la del H-2, esto probablemente se debió al mejor desarrollo de la biomasa de las plantas sembradas en el humedal H-1 a través de una mejor asimilación de los nutrientes (fósforo).

Con lo descrito en los párrafos precedentes, se corrobora que los humedales de flujo vertical no son sistemas eficientes para remover fósforo total (Vymazal, Removal of nutrients in various types of constructed wetlands, 2007), se considera que los mecanismos para remover fósforo es a través de la asimilación de las plantas y microorganismos y la adsorción del medio granular, este pequeño porcentaje de reducción varía entre el 10 – 20% del fósforo (García & Corzo, 2008).

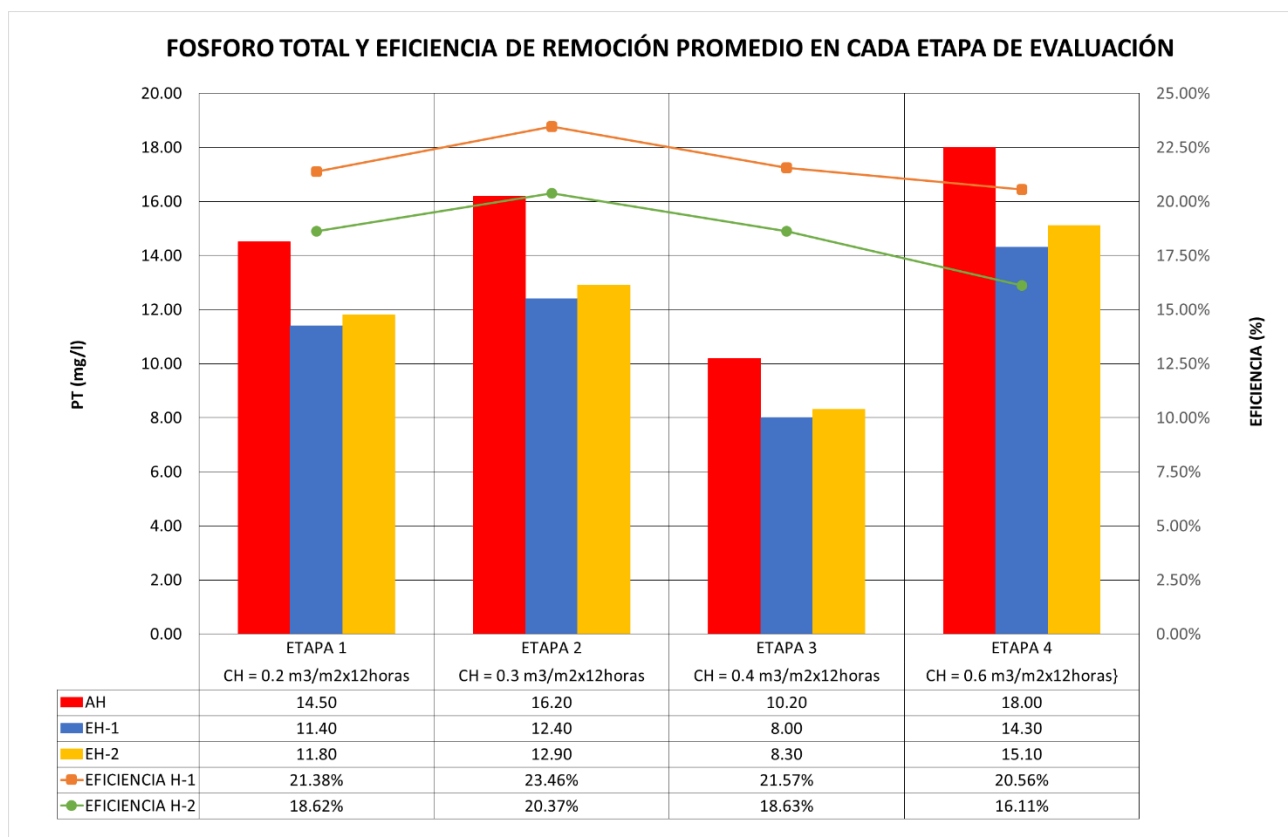


Gráfico 4-23 Fósforo Total y su eficiencia de reducción en cada etapa de evaluación

4.2.9. Hierro Total

El hierro total en cada punto de monitoreo se midió en la etapa 4, solo se realizó una medición en la última semana de evaluación de la etapa.

En el Gráfico 4-24 se muestra el hierro total para la etapa 4, así mismo en la Tabla 4-6 se puede apreciar la eficiencia de reducción de hierro total para ambos humedales evaluados.

Tabla 4-6 Hierro Total y su eficiencia de reducción en la etapa 4

ETAPA	CARGA HIDRÁULICA (m ³ /m ² x12horas)	HIERRO TOTAL			EFICIENCIA	
		AH	EH-1	EH-2	EH-1	EH-2
ETAPA 4	0.6	0.17	0.14	0.07	13.86%	60.54%

De acuerdo con la Tabla 4-6 se tiene una eficiencia de reducción de 13.86% y 60.54% para el humedal H-1 y H-2 respectivamente, esta eficiencia de reducción probablemente se debió a la asimilación por parte de las plantas y adsorción del medio granular de los humedales H-1 y H-2, también podemos observar que la eficiencia de reducción del humedal H-2 es mayor del humedal H-1, esto probablemente se debió a una mayor capacidad de adsorción de la arena con respecto a la grava, como se sabe el humedal H-2 contiene un mayor porcentaje de finos (arena) en consecuencia presentara una mayor eficiencia de reducción de hierro.

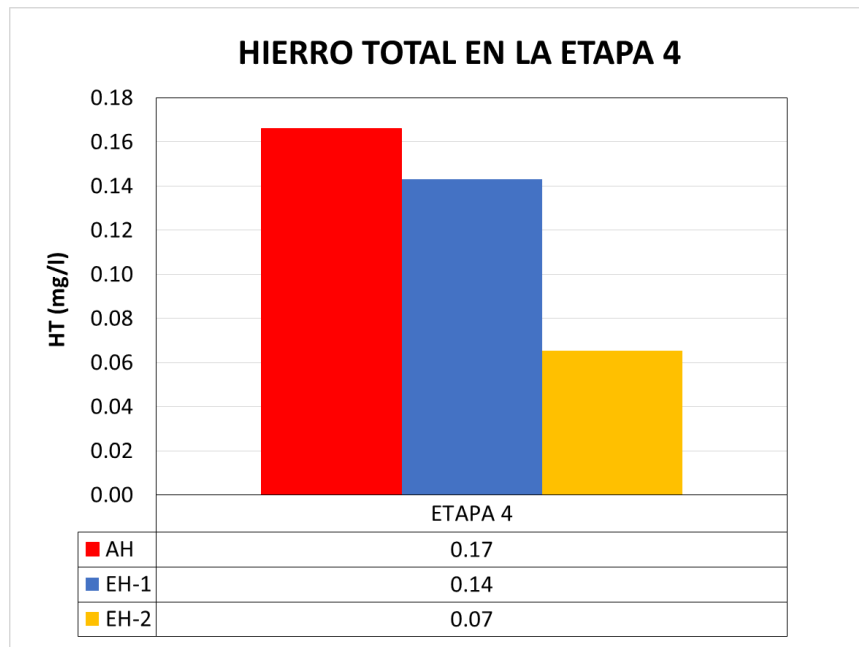


Gráfico 4-24 Hierro Total en la etapa 4

4.3. Análisis microbiológicos

4.3.1. Coliformes termotolerantes

Los Coliformes Termotolerantes en cada punto de monitoreo se midió en las etapas 1 al 4, solo se realizó una medición por etapa, generalmente en la última semana de evaluación de cada etapa.

Del Gráfico 4-25 tenemos un rango de eficiencia de reducción de coliformes termotolerantes de 82.96% - 99.55% y 82.96% - 99.96% para el humedal H-

1 y Humedal H-2 respectivamente, estos rangos de eficiencias de reducción obedecen a los procesos de filtración a través de los sustratos que componen el medio granular y al tiempo de retención que se origina al evaluar cada etapa en ambos humedales H-1 y H-2.

De acuerdo con el Gráfico 4-25 podemos observar que la eficiencia de reducción aumenta entre la etapa 1 y 2, luego comienza a descender durante las etapas 3 y 4, teniendo así para la etapa 2 la mayor eficiencia de reducción de coliformes termotolerantes, siendo sus valores de 99.55% y 99.96% para el humedal H-1 y H-2 respectivamente.

Con respecto a la variable de la composición del medio granular de cada humedal, se puede observar en el mismo Gráfico 4-25 que la eficiencia de reducción promedio de los coliformes termotolerantes del humedal H-2 es mayor al del humedal H-1 para las etapas 1 y 2, esto se debió a la altura de los sustratos que comprenden el medio granular de cada humedal, como se sabe el medio granular del humedal H-2 contiene un mayor porcentaje de finos en referencia al humedal H-1 lo cual permite una mayor retención de los coliformes termotolerantes a raíz de una menor porosidad del medio granular y también a un mayor tiempo de retención del humedal H-2, tal como se explicó en el ítem 4.1.9 Tiempo de retención hidráulico (TRH); con respecto a las etapas 3 y 4, ambos humedales mostraron la misma eficiencia de reducción, probablemente al tener un menor tiempo de retención los coliformes termotolerantes fueron arrastrados a una mayor velocidad a consecuencia de aumentar la carga hidráulica.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones realizadas en años anteriores tenemos; Bohórquez Bedoya en el 2015 obtuvo una eficiencia de reducción mayor a 96.83% para humedales basados en arena únicamente, para una carga hidráulica similar a la de la etapa 1; por otro lado Torbisco Saenz en el año 2017 obtuvo para un humedal de similares características del humedal H-2 una eficiencia de reducción del 99.97% para una carga hidráulica similar a la etapa 2, donde el vegetal sembrado fue el *Chrysopogon Zizanioides* (vetiver) y por último Gómez Lordan (2017) encontró una

eficiencia de reducción de 99.5% para un humedal sembrado con *Cyperus Alternifolius* similar al humedal H-2.

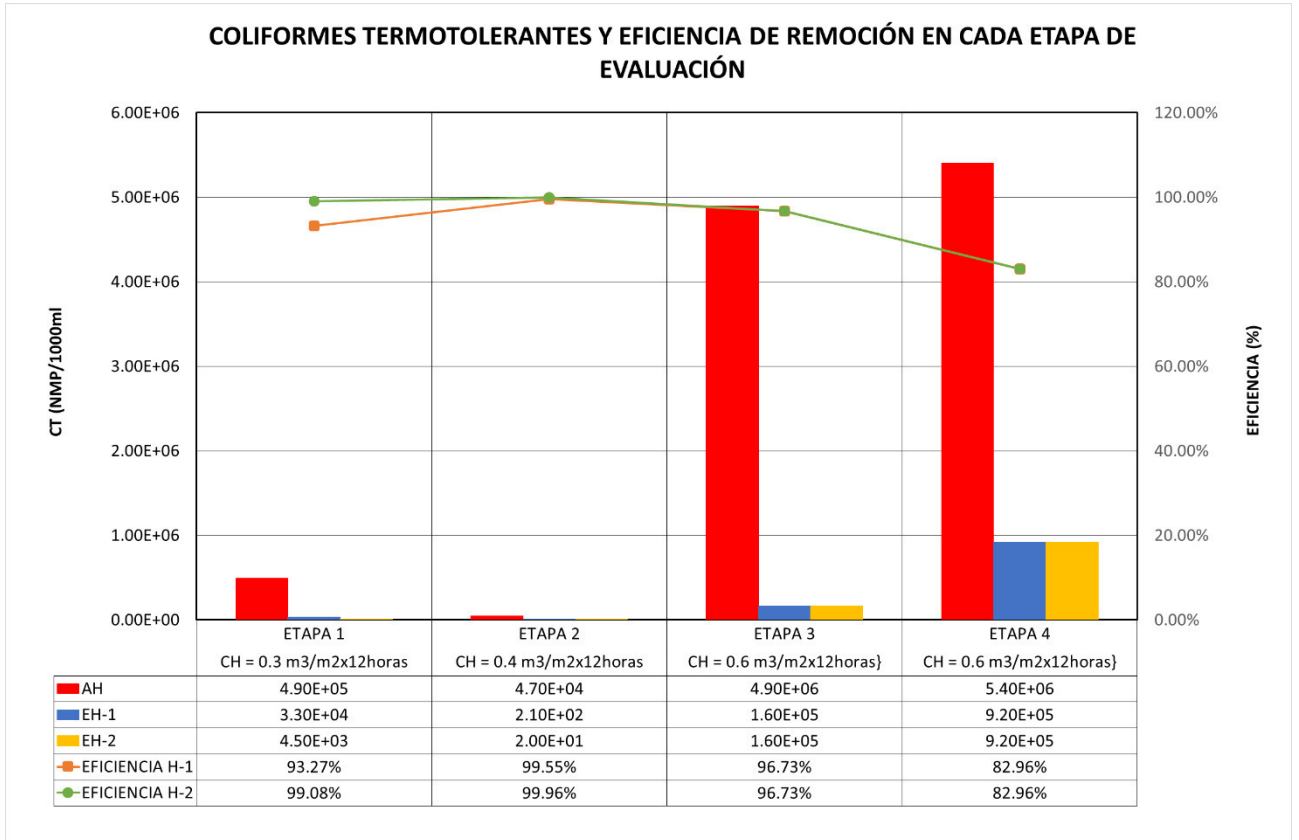


Gráfico 4-25 Coliformes Termotolerantes y su eficiencia de reducción en cada etapa de evaluación

4.4. Mayores eficiencias de reducción para los humedales H-1 y H-2

De los resultados obtenidos en la descripción de cada parámetro evaluado se realizó la Tabla 4-7 y Tabla 4-8 que muestra el resumen de las eficiencias de reducción de los contaminantes para los humedales H-1 y H-2 respectivamente.

De acuerdo a ello tenemos que las mayores eficiencias de reducción para los parámetros de DBO₅, DQO, SST, Nitrógeno amoniacal y un mayor aumento de los nitratos se dieron en la etapa 1, en cuanto a los parámetros de turbiedad, nitrógeno total, coliformes termotolerantes y fósforo total se dieron en la etapa 2 y por último para el parámetro de nitritos se dio en la etapa 4 para ambos humedales H-1 y H-2.

Tabla 4-7 Resumen de las eficiencias de reducción de los contaminantes para el humedal H-1

PARAMETRO	ETAPAS				
	ETAPA - PUESTA EN MARCHA	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4
TURBIEDAD	90.66%	93.97%	96.46%	95.81%	95.31%
DBO ₅	91.38%	95.26%	92.81%	91.75%	89.43%
DQO	79.90%	81.49%	73.55%	76.32%	71.96%
SST	78.67%	84.31%	84.28%	84.19%	57.26%
NITRÓGENO AMONIAICAL	-	90.55%	89.24%	77.50%	66.67%
NITRITOS	-	81.37%	92.87%	95.89%	96.98%
NITRATOS*	-	19.53	16.60	12.68	11.80
NITRÓGENO TOTAL	-	13.94%	27.00%	15.98%	20.91%
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	-	93.27%	99.55%	96.73%	82.96%
FÓSFORO TOTAL	-	21.38%	23.46%	21.57%	20.56%

Tabla 4-8 Resumen de las eficiencias de reducción de los contaminantes para el humedal H-2

PARAMETRO	ETAPAS				
	ETAPA - PUESTA EN MARCHA	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4
TURBIEDAD	93.86%	95.54%	98.38%	97.39%	95.97%
DBO ₅	93.34%	97.35%	94.23%	95.58%	91.23%
DQO	82.68%	86.61%	76.52%	78.55%	74.59%
SST	79.27%	88.56%	86.79%	87.91%	61.67%
NITRÓGENO AMONIAICAL	-	96.06%	94.30%	78.75%	67.82%
NITRITOS	-	90.97%	95.48%	97.03%	97.00%
NITRATOS*	-	30.90	21.63	19.90	11.85
NITRÓGENO TOTAL	-	12.12%	25.40%	13.02%	18.97%
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	-	99.08%	99.96%	96.73%	82.96%
FÓSFORO TOTAL	-	18.62%	20.37%	18.63%	16.11%

5. CONCLUSIONES

- ❖ Se determinó que para las cargas hidráulicas evaluadas de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, $0.4\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, el Humedal Vertical H-2 es más eficiente que el Humedal Vertical H-1 para los parámetros de turbiedad, DBO_5 , DQO, SST, NH_4^+ , nitritos, hierro total, coliformes termotolerantes; a consecuencia de la composición del medio granular del humedal H-2, el cual contiene 0.40m de arena gruesa a comparación del humedal H-1 que tiene 0.20m, permitiendo un mejor desarrollo de las biopelículas.
- ❖ Se determinó que los humedales H-1 y H-2 con medio granular heterogéneo presentaron una eficiencia de reducción de la DBO_5 mayor al 95% cuando fueron evaluadas para una carga hidráulica de $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$.
- ❖ Se verificó que para la carga hidráulica de $0.2\text{ m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, los Humedales Verticales H-1 y H-2 fueron más eficientes en la reducción de la DBO_5 , DQO, SST, NH_4^+ en comparación a las cargas hidráulicas $0.3\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, $0.4\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$; debido a que el tiempo de retención hidráulico de esta etapa fue mayor a las otras tres etapas evaluadas.
- ❖ Se verificó que para la carga hidráulica de $0.3\text{ m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, los Humedales Verticales H-1 y H-2 fueron más eficientes en la reducción de turbiedad y coliformes termotolerantes en comparación a las cargas hidráulicas $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, $0.4\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$; a consecuencia del proceso físico de la adsorción que se desarrolla dentro del medio granular de ambos humedales.
- ❖ Para los humedales H-1 y H-2 evaluados para la carga hidráulica de $0.3\text{ m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, se obtuvo una mayor eficiencia de reducción del nitrógeno total y fósforo total en comparación a las cargas hidráulicas $0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$, $0.4\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$ y $0.6\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$; esto como consecuencia de una mayor asimilación de nutrientes por los vegetales que fueron originados por su mayor crecimiento de estos.
- ❖ Se verificó que ambos humedales tienen la capacidad para remover altas concentraciones de nitritos que puedan presentarse en las aguas residuales,

conforme se aumentó la carga hidráulica en cada etapa de los humedales H-1 y H-2.

- ❖ La eficiencia de reducción promedio de la materia orgánica medida como DBO_5 del humedal H-2 es mayor al del Humedal H-1 en todas las etapas de evaluación, esto es debido a la composición del medio granular del H-2 la cual tienen un mayor porcentaje de finos (arena gruesa) y presenta un mejor desarrollo del sistema radicular de las plantas lo cual brinda una mayor área superficial disponible para que los microorganismos puedan desarrollar las biopelículas y con ello poder remover la materia orgánica con un mayor eficiencia.
- ❖ El humedal H-1 presentó una mayor eficiencia de reducción que el humedal H-2 para los parámetros de nitrógeno total y fósforo total, esto se debió a un mayor desarrollo de la biomasa de las plantas del humedal H-1 a través de una mejor asimilación de nutrientes en comparación al humedal H-2.
- ❖ La variación de la carga hidráulica en las diferentes etapas de evaluación no afectó de manera significativa en las concentraciones de DBO_5 y DQO de los efluentes del humedal H-1 y H-2; teniendo variaciones de $\pm 5\%$.
- ❖ La eficiencia de reducción promedio de la materia orgánica medida como DBO_5 para la etapa 1 ($0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$) fue de 95.26% y 97.35% alcanzando concentraciones promedio de 4.20mg/l y 2.35mg/l para el humedal H-1 y H-2 respectivamente, siendo estos valores menores a lo requerido por el ECA – categoría 3 (15 mg/l).
- ❖ La eficiencia de reducción promedio del parámetro de DQO para la etapa 1 ($0.2\text{m}^3/\text{m}^2 \times 12\text{horas}$) fue de 81.49% y 86.61% alcanzando concentraciones promedio de 28.00mg/l y 20.25mg/l para el humedal H-1 y H-2 respectivamente, siendo estos valores menores a lo requerido por el ECA – categoría 3 (40mg/l).
- ❖ La eficiencia de reducción promedio del parámetro de nitrito fue de 91.05% y 94.10% alcanzando concentraciones máximas de 1.31mg/l y 1.45mg/l y la suma de las concentraciones del nitrito y del nitrato para los efluentes fueron como máximo 36.31mg/l y 52.65mg/l para el humedal H-1 y H-2 respectivamente, siendo estos valores menores a lo requerido por el ECA – categoría 3 (10 mg/l y 100 mg/l).

- ❖ La temperatura ambiental en promedio vario entre 23.55°C y 29.30°C en todo el periodo de evaluación experimental del sistema, lo cual permitió un adecuado crecimiento de las plantas, teniendo temperaturas máximas en los meses de enero y febrero lo cual coincide con la mayor tasa de crecimiento de los vegetales, por otro lado, este rango de temperatura permitió un adecuado crecimiento de las biopelículas conformado por microorganismos para degradar la materia orgánica.
- ❖ El calor especifico que presenta el agua residual es mucho mayor al calor especifico del aire, lo cual hace que la variación de la temperatura del aire sea más rápida que la variación de la temperatura del agua residual, es decir que, ante variaciones fuertes de temperatura durante el día, la temperatura del aire es menor a la temperatura del agua residual.
- ❖ El rango de variación de la temperatura del agua residual fue favorable para el desarrollo de los diferentes procesos de degradación de materia orgánica presente en el afluente de los humedales.
- ❖ El rango de variación del OD en los afluentes de los humedales H-1 y H-2 estuvo comprendido entre los valores de 3.30mg/l – 6.27mg/l y 3.57mg/l – 6.12mg/l, con ello se puede corroborar la buena transferencia del oxígeno atmosférico al medio granular debido a la instalación de tuberías de ventilación, al periodo de alimentación y descanso que permite una re-oxigenación a través de los espacios intersticiales del medio granular y a la presencia del *Cyperus alternifolius* que a través de sus raíces aportan a la transferencia del oxígeno, como podemos observar no fue necesario la instalación de equipos eléctricos o mecánicos para la aireación del agua residual y con ello la tecnología de los humedales construidos se convierte en una tecnología de bajo costo de operación y mantenimiento siendo viable su construcción para zonas rurales del país.
- ❖ La reducción del pH a valores cercanos al 6 no dificulta el proceso biológico que se desarrolla en los humedales verticales, producto del proceso de nitrificación; al respecto, se puede precisar que este tipo de tratamiento tiene la capacidad de poder trabajar con pH de 6, asimismo el pH de los efluentes de los humedales H-1 y H-2 desciende conforme se incrementa la carga hidráulica.

- ❖ El valor máximo de la conductividad fue de 1237.60 μ s/cm y 1095.50 μ s/cm para el efluente del humedal H-1 y H-2 respectivamente los cuales son menores a los valores requeridos con el ECA 3 – categoría 3.
- ❖ El tiempo de retención fue mayor para el humedal H-2 debido a la composición de su medio granular y aún mejor desarrollo de las raíces de las plantas sembradas, según lo descrito en el ANEXO N° 3 – TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO.
- ❖ La mayor asimilación de nutrientes por parte de los vegetales del humedal H-1 produjo que su tasa de crecimiento sea mayor con respecto al del humedal H-2, debido que el medio granular del humedal H-1 estaba conformado por una mayor proporción de grava lo cual brindaba una mayor capacidad para el paso del agua residual, pudiendo asimilar de una manera rápida los nutrientes, asimismo los vegetales del humedal H-1 alcanzó una mayor altura promedio con respecto al del humedal H-2.
- ❖ La composición del medio granular con arena gruesa, confitillo y grava gruesa (piedra chancada) permitieron una mejor reducción de los contaminantes debido a la mejor capacidad de filtración y la mayor área superficial disponible que presenta la arena gruesa, por otro lado el confitillo y la grava gruesa permiten que el agua residual pueda descender de manera vertical a una velocidad adecuada que impide el estancamiento del agua residual en la superficie.
- ❖ Se determinó que la configuración óptima producto de la presente investigación, es para un humedal vertical con un medio granular de 0.40m de arena gruesa, 0.20m de confitillo y 0.15m de piedra chancada, operando a una carga hidráulica de 0.2m³/m²x12horas.
- ❖ El *Cyperus alternifolius* se desarrolló de manera eficiente ante los factores ambientales favorables que fueron expuestas y a las concentraciones de los contaminantes del afluente del agua residual, al contrario, brindaron los nutrientes necesarios que favorecieron un óptimo crecimiento y desarrollo de las raíces y partes aéreas del vegetal.

6. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda continuar con la investigación con el uso de diferentes macrófitas para humedales del tipo H-2, el cual presento las mejores eficiencias de reducción de contaminantes.
- ❖ Se recomienda estudiar humedales verticales para un mayor rango de altura de arena gruesa, como parte principal del sustrato del medio granular.
- ❖ Para una próxima investigación se debería de incluir la poda de los vegetales antes de la senescencia y así poder observar como varia la reducción de los contaminantes.
- ❖ El periodo de duración de la evaluación de las etapas 1 al 4 deberán ser como mínimo dos meses cada una, para así poder garantizar la estabilización del humedal ante el cambio de la carga hidráulica y poder encontrar valores de eficiencias de reducción más estables.
- ❖ Se recomienda medir las concentraciones de oxígeno disuelto a diferentes profundidades del humedal y así poder observar su variación o las posibles existencias de zonas anóxicas donde pueda darse la desnitrificación.
- ❖ Para unas próximas investigaciones se recomienda incluir la medición del parámetro de la alcalinidad debido a que es un factor incidente en los procesos de nitrificación.
- ❖ Se recomienda hacer medición de caudales de los efluentes y así poder comparar las cargas orgánicas removidas de cada contaminante evaluado.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agua, C. N. (s.f.). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales*. México.
- Arias Triguero, Ó. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales contruidos de flujo subsuperficial*. Barcelona - España: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Bohórquez Bedoya, E. (2015). *Efectos del medio filtrante y la frecuencia de alimentación en humedales contruidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales*. Pereira, Risaralda: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science & Technology*, 71-78.
- Cárdenas Calvachi, G., & Sánchez Ortiz, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 72-88.
- Cooper, P., Job, G., & Green, M. (1996). Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. *Water Research Centre*.
- Crites, R., Middlebrooks, J., Bastian, R., & Reed, S. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. CRC Press.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio*. Cochabamba - Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- Enrique de Ascoitia, T. (2012). *Efecto de sobrecargas hidráulicas en el rendimiento de humedales contruidos para la depuración de aguas*. Barcelona - España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Fountoulakis, M., Terzakis, S., Chatzinotas, A., Brix, H., Kalogerakis, N., & Manios, T. (2009). Pilotscale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached biofilm reactors for domestic wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 2996-3003.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales Contruidos*. España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gómez Lordan, Y. (2017). *Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales verticales empleando Cyperus Alternifolius y Chrysopogon Zizanioides*

- para el tratamiento de aguas servidas*. Lima - Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Gunter Langergraber, G. D., Jaime Nivala, P. M., Otto Stein, J. P., & Von Sperling, M. (2017). Volume 7 Treatment Wetlands. En *Biological Wastewater Treatment Series*. IWA PUBLISHING.
- Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., & Von Muench, E. (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Alemania: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania - Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN.
- Jiménez Douglas, E. (2010). *Modelación matemática del proceso de nitrificación en dos etapas*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Kadlec, R., & Knight, R. (1995). *Treatment Wetlands*. Lewis: Boca Ratón.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands* (Vol. Second edition). Estados Unidos: Taylor & Francis Web.
- Lara Borrero, J., & Salgot, M. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Barcelona - España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Llagas Chafloque, W., & Guadalupe Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 85-96.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de Agua Residuales* (Tercera Edición ed. ed.). Madrid.
- Miglio, R., & Espinoza, R. (2003). Evaluación del comportamiento de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la granja de porcinos de la UNALM. *Anales Científicos*, 85-99.
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 33-46.
- Ngo, D., Konnerup, D., Henrik, H., Huu, N., Tuan, L., & Brix, H. (2010). Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate. *Ecological Engineering*, 527-535.

- Pérez, M. (2012). Vertical subsurface wetlands for wastewater purification. *Procedia-Engineering*, 1960-1968.
- Reed, S., Crites, R., & Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. New York - Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Rodríguez González, M. R., Molina Burgos, J., Jácome Burgos, A., & Suárez López, J. (2012). Humedal de Flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV(2), 223-235.
- Sanz, m., Dana, E., & Sobrino, E. (2004). *Atlas de las plantas alóctonas invasoras en España*. Madrid España: Dirección General para la Biodiversidad.
- Silva V., J. P. (s.f.). *Humedales Construidos*. Colombia: Universidad del Valle.
- The Water Environment Federation. (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*.
- Torbisco Sáenz, M. (2017). *Eficiencia de un humedal de flujo vertical sembrada con Chrysopogon Zizanioides para el tratamiento del efluente de un reactor UASB*. Lima - Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 48-65.
- Vymazal, J. (2008). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *The 12th World Lake Conference*, (págs. 965-980).
- Yao, S. (2011). comparative study on the potential of oxygen release by roots of selected wetland plants. *Phys Chem Earth*, 475-478.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO N° 1 – POROSIDAD DE CADA SUSTRATO DEL MEDIO GRANULAR

La porosidad inicial de cada sustrato del medio granular fue calculada como el porcentaje que representan los espacios vacíos sobre el volumen de cada sustrato en el medio granular del humedal a diseñar.

Para calcular los espacios vacíos en el volumen de cada sustrato del medio granular, se siguieron los siguientes pasos:

1. Primero cabe mencionar los materiales utilizados para este procedimiento:
 - Un balde con muestra de arena gruesa.
 - Un balde con muestra de confitillo – grava de 5-10mm
 - Un balde con muestra de piedra chancada – grava de 20-40mm
 - Una probeta de 1000 ml.
 - Una probeta de 50 ml.
 - Un balde con agua limpia.
2. Verter la muestra en la probeta hasta llegar al volumen de 1000 ml.
3. Agregar agua limpia con una probeta de 50 ml, cuantas veces sea necesario, hasta que el nivel del agua llegue al límite de 1000 ml en la probeta donde se encuentra la muestra, el fin de utilizar una probeta de 50 ml es para calcular el volumen de agua utilizado en cada prueba.

De la misma manera se debe realizar el mismo procedimiento para cada sustrato que conforma el medio granular; para cada prueba se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se mostraran en la Tabla 8-1, Tabla 8-2 y Tabla 8-3.

Tabla 8-1 Calculo de la porosidad de la arena gruesa

POROSIDAD DE LA ARENA GRUESA			
Nº Prueba	Volumen de Agua agregado (ml)	Volumen de muestra (ml)	Porosidad (%)
Prueba N° 1	380.00	1000.00	38.00
Prueba N° 2	390.00	1000.00	39.00
Prueba N° 3	375.00	1000.00	37.50
POROSIDAD PROMEDIO			38.00

Tabla 8-2 Calculo de la porosidad del confitillo – grava de 5-10mm

POROSIDAD DEL CONFITILLO - GRAVA DE 5-10 mm			
Nº Prueba	Volumen de Agua agregado (ml)	Volumen de muestra (ml)	Porosidad (%)
Prueba Nº 1	445.00	1000.00	44.50
Prueba Nº 2	447.50	1000.00	44.75
Prueba Nº 3	441.00	1000.00	44.10
POROSIDAD PROMEDIO			44.00

Tabla 8-3 Calculo de la porosidad de la piedra chancada – grava de 20-40mm

POROSIDAD DE LA PIEDRA CHANCADA - GRAVA DE 20-40 mm			
Nº Prueba	Volumen de Agua agregado (ml)	Volumen de muestra (ml)	Porosidad (%)
Prueba Nº 1	483.00	1000.00	48.30
Prueba Nº 2	481.00	1000.00	48.10
Prueba Nº 3	479.00	1000.00	47.90
POROSIDAD PROMEDIO			48.00

8.2. ANEXO Nº 2 – DISEÑO DEL HUMEDAL VERTICAL

Para diseñar un humedal artificial vertical se puede considerar su funcionamiento para reducción de DBO, como reactores biológicos con biomasa adherida y su comportamiento puede ser descrito por una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón.

$$C_f = C_o e^{-Kt} \quad \dots (1)$$

Donde:

C_o : Concentración del contaminante en el afluente (mg/l)

C_f : Concentración del contaminante en el efluente (mg/l)

K: Constante de velocidad de reacción de primer orden (d^{-1})

t: tiempo de retención hidráulica (d)

El valor de “K” dependerá del tipo de contaminante a remover y de la temperatura, para este humedal se está diseñando para la reducción de DBO_5 , por ello para determinar el valor de “K” para la reducción de DBO_5 se utilizó la siguiente ecuación:

$$K_{DBO} = K_{20}(1.06)^{(T-20)} \quad \dots (2)$$

Donde:

K_{20} : Constante de velocidad a 25°C (d^{-1})

T: Temperatura de operación del sistema (°C)

Para la determinación del lado de la sección superficial cuadrada se utilizara la siguiente ecuación:

$$w = \sqrt{\frac{Q(\ln C_o - \ln C_f)}{K_{DBO} (h_1 x n_1 + h_2 x n_2 + h_3 x n_3)}} \dots (3)$$

Donde

- w = Lado del humedal de sección cuadrada (m)
- h_1 = Altura del sustrato 1 en el medio granular
- h_2 = Altura del sustrato 2 en el medio granular
- h_3 = Altura del sustrato 3 en el medio granular
- n_1 = Porosidad del sustrato 1 en el medio granular
- n_2 = Porosidad del sustrato 2 en el medio granular
- n_3 = Porosidad del sustrato 3 en el medio granular
- Q = Caudal promedio a través de los humedales

En ese sentido, para el diseño se considera $K_{20}=1.104d^{-1}$ y la temperatura de diseño de operación del sistema es de 25°C.

Reemplazando los valores en la ecuación 2, se obtiene:

$$K_{DBO} = 1.104d^{-1}(1.06)^{(25-20)}$$

$$K_{DBO} = 1.477d^{-1}$$

Asimismo, se consideró las concentraciones de DBO_5 para el afluente y efluente valores iguales a 80 mg/l y 5mg/l respectivamente, y se reemplazaron los siguientes valores en la ecuación (3).

- w = Lado del humedal se sección cuadrada (m)
- $h_1 = 0.40$ metros – Altura del sustrato 1 en el medio granular
- $h_2 = 0.20$ metros – Altura del sustrato 2 en el medio granular
- $h_3 = 0.15$ metros – Altura del sustrato 3 en el medio granular

- $n_1 = 38\%$ – Porosidad del sustrato 1 en el medio granular
- $n_2 = 44\%$ – Porosidad del sustrato 2 en el medio granular
- $n_3 = 48\%$ – Porosidad del sustrato 3 en el medio granular
- $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{d}$ - Caudal promedio a través de los humedales

$$w = \sqrt{\frac{Q(\ln C_o - \ln C_f)}{K_{DBO} (h_1 x n_1 + h_2 x n_2 + h_3 x n_3)}} \dots (3)$$

$$w = \sqrt{\frac{\frac{0.30 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{2} (\ln 80 - \ln 5)}{1.477 \text{d}^{-1} (0.40 \text{m} x 38\% + 0.20 \text{m} x 44\% + 0.15 \text{m} x 48\%)}} \dots (3)$$

$$w = 1.0 \text{ m}$$

Ahora con las dimensiones obtenidas del humedal procederemos a calcular la Carga Hidráulica Superficial (CHS), para ello tenemos la siguiente ecuación:

$$\text{Carga Hidráulica Superficial (CHS)} = \frac{\text{Caudal } (\text{m}^3/\text{día})}{\text{Area } (\text{m}^2)} \dots (4)$$

Reemplazando los valores obtenidos en las ecuaciones anteriores, tenemos:

$$\text{Carga Hidráulica Superficial (CHS)} = \frac{0.30 (\text{m}^3/\text{día})}{1.00 \text{m} x 1.00 \text{m}}$$

$$\text{CHS} = 300 \text{ mm/día}$$

De igual manera se obtendrá el valor de la Carga Orgánica Superficial (C.O.S.), con la ecuación 5 hallaremos el valor de C.O.S.

$$\text{C.O.S.} = \frac{\text{Caudal } (\text{m}^3/\text{día}) x \text{Concentración } \text{DBO}_5 (\text{mg}/\text{l})}{\text{Area } (\text{m}^2)} \dots (5)$$

Igualmente reemplazaremos los valores obtenidos en ecuaciones anteriores, de lo cual obtendremos:

$$\text{C.O.S.} = \frac{0.30 (\text{m}^3/\text{día}) x 80 (\text{mg}/\text{l})}{1.00 \text{m} x 1.00 \text{m}}$$

$$C.O.S. = 26.6 \text{ g } DBO_5 / m^2 \times \text{día}$$

Según lo recomendado por (García & Corzo, 2008), la Carga orgánica Superficial debe tener un valor alrededor de 20-40 g $DBO_5/m^2/d$; para el diseño del humedal hemos obtenido un valor de C.O.S. igual a 26.6 g $DBO_5/m^2/d$, del cual podemos concluir que se encuentra alrededor del valor sugerido.

Por último, el tiempo de retención hidráulica para el humedal vertical se determinará mediante la ecuación 1, reemplazando valores se tiene:

$$C_f = C_o e^{-Kt} \quad \dots (1)$$

$$80 \frac{mg}{l} = 5 \frac{mg}{l} e^{-1.477t}$$

$$t = 1.88 \text{ d}$$

8.3. ANEXO N° 3 – TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

En la presente investigación se determinó el tiempo de retención hidráulico para los humedales verticales H-1 y H-2, fue realizado al término de la etapa 4 de evaluación, donde ambos humedales estaban siendo alimentados con un caudal de 7 ml/s y con una carga hidráulica de $0.6m^3/m^2 \times 12$ horas.

Para determinar el tiempo retención hidráulico real se utilizó como trazador al cloruro de sodio (sal de mesa), con ello se prepara una solución salina para ser aplicado a ambos humedales, el procedimiento a seguir se detallará a continuación:

- Se preparó 250 litros de una solución de cloruro de sodio con una conductividad de 15.00mS/cm.
- Para la aplicación de la solución de cloruro de sodio a los humedales verticales, su utilizó una bomba sumergible, la cual trabajo con un caudal de alimentación de 7 ml/s.
- Mientras los humedales estaban siendo alimentados con agua residual proveniente del reactor UASB, se interrumpió el flujo de 7ml/s para luego ser alimentado de manera instantánea con la solución de cloruro de sodio,

esta alimentación durara hasta que se consuma todo el volumen preparado de la solución salina.

- Una vez terminado el volumen de la solución salina, instantáneamente se procede alimentar a los humedales con el efluente del reactor UASB.
- Las mediciones de la conductividad en los efluentes de los humedales H-1 y H-2 se iniciaron después de haber transcurrido 5 minutos desde el momento que empezó alimentarse los humedales con la solución salina y concluirán cuando la concentración de los efluentes de los humedales tenga una conductividad igual o similar al del efluente del reactor UASB antes de la interrupción para alimentar la solución salina a los humedales.
- La frecuencia de medición de la conductividad fue cada 5 minutos al iniciar la prueba, luego cada 10 minutos, para el humedal vertical H-1 se alcanzó una conductividad máxima de 14.63 mS/cm en un tiempo de 320 minutos y para el humedal vertical H-2 se alcanzó una conductividad máxima de 14.59 mS/cm en un tiempo de 341 minutos.

Tabla 8-4 Conductividad de los humedales H-1 y H-2 en el tiempo

H-1		H-2	
TIEMPO (Minutos)	Conductividad EH-1 (mS/cm)	TIEMPO (Minutos)	Conductividad EH-2 (mS/cm)
0.00	1.697	0.00	1.767
7.00	2.500	5.00	1.790
14.00	3.560	10.00	1.785
18.00	3.700	15.00	1.950
22.00	3.950	20.00	2.160
27.00	4.210	23.00	2.420
33.00	4.780	29.00	2.840
39.00	5.370	35.00	3.430
46.00	6.260	40.00	4.080
52.00	6.920	47.00	4.970
60.00	7.620	53.00	5.850
68.00	8.230	61.00	6.890
73.00	8.610	69.00	7.860
78.00	9.040	74.00	8.450
83.00	9.350	80.00	9.000
90.00	9.800	85.00	9.500
98.00	10.310	92.00	10.130
105.00	10.650	99.00	10.670
112.00	10.920	106.00	11.150
120.00	11.320	113.00	11.490
127.00	11.760	123.00	12.000

H-1		H-2	
TIEMPO (Minutos)	Conductividad EH-1 (mS/cm)	TIEMPO (Minutos)	Conductividad EH-2 (mS/cm)
134.00	11.960	128.00	12.220
140.00	12.220	135.00	12.470
145.00	12.350	141.00	12.650
151.00	12.450	146.00	12.800
158.00	12.570	152.00	12.940
166.00	12.760	159.00	13.040
172.00	12.980	167.00	13.290
180.00	13.160	174.00	13.420
186.00	13.280	181.00	13.570
192.00	13.410	187.00	13.660
196.00	13.480	193.00	13.730
202.00	13.620	198.00	13.790
207.00	13.620	204.00	13.870
216.00	13.800	209.00	13.940
246.00	14.070	218.00	14.030
253.00	14.160	247.00	14.250
259.00	14.220	254.00	14.340
264.00	14.290	260.00	14.350
271.00	14.360	266.00	14.380
281.00	14.440	273.00	14.420
287.00	14.490	283.00	14.450
294.00	14.490	289.00	14.470
300.00	14.510	296.00	14.500
306.00	14.540	302.00	14.510
312.00	14.540	307.00	14.530
320.00	14.630	313.00	14.530
328.00	14.630	322.00	14.560
333.00	14.590	330.00	14.580
343.00	14.360	341.00	14.590
355.00	14.150	353.00	14.280
366.00	13.500	365.00	14.170
380.00	12.560	378.00	13.570
391.00	11.500	390.00	13.240
406.00	10.600	404.00	12.200
415.00	9.700	413.00	10.570
425.00	8.540	423.00	9.100
434.00	7.770	432.00	8.100
444.00	7.330	442.00	7.240
454.00	6.660	452.00	6.440
464.00	6.440	462.00	5.860
471.00	6.010	469.00	5.490

ETAPAS	Fecha	Hora	AH (Afluente de los Humedales)					EH-1 (Efluente del Humedal H-1)					EH-2 (Efluente del Humedal H-2)					T. Amb.	H. R.
			T°C	pH	OD	Conduc.	Turbi.	T°C	pH	OD	Conduc.	Turbi.	T°C	pH	OD	Conduc.	Turbi.		
	26/04/2017	9:30 am	23.50	7.23	0.15	872.00	87.20	23.60	6.48	4.28	884.60	7.85	23.60	6.27	5.00	830.20	1.99	24.00	71%
	27/04/2017	9:30 am	24.70	7.11	0.17	1,009.00	54.40	24.50	6.31	4.26	883.10	1.77	24.20	6.20	5.53	856.40	2.29	23.70	64%
		4:30 pm	25.90	6.83	0.18	1,019.00	69.30	25.00	5.97	4.22	1,117.00	3.43	24.80	5.75	4.63	1,034.00	3.50		
	28/04/2017	9:30 am	23.50	6.87	0.17	1,014.00	61.10	23.80	6.16	4.75	897.40	2.05	23.40	6.00	4.46	839.40	2.03	23.50	68%
		4:30 pm	23.60	6.89	0.15	1,007.00	93.90	22.80	5.71	5.39	968.80	2.96	23.70	5.71	4.03	845.70	1.74	23.40	68%

Tabla 8-6 Resultados del promedio semanal de los parámetros diarios para los puntos de monitoreo y de la temperatura ambiental y humedad relativa

ETAPAS	SEMANAS	AH (Afluente de los Humedales)					EH-1 (Efluente del Humedal H-1)					EH-2 (Efluente del Humedal H-2)					T. Amb	H. R.
		T°C	PH	OD	Conduc.	Turbi.	T°C	PH	OD	Conduc.	Turbi.	T°C	PH	OD	Conduc.	Turbi.		
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	1	20.48	6.91	0.26	1,237.60	126.62	19.88	6.59	3.38	1,235.20	12.80	19.72	6.71	4.31	1,095.50	4.13		
	2	21.50	7.19	0.20	1,093.33	116.97	21.10	6.30	4.35	992.67	6.02	21.20	6.07	4.81	989.00	4.09		
	3	21.73	6.94	0.16	1,080.75	141.25	21.13	6.37	6.27	971.25	14.31	21.03	6.07	5.66	959.00	7.35		
	4	21.33	7.08	0.24	1,150.25	110.30	21.00	6.57	4.09	1,063.50	11.91	20.80	6.43	4.75	968.00	7.27		
	5	23.20	6.90	0.23	1,165.50	54.63	22.65	6.77	4.30	1,051.75	12.51	22.58	6.20	5.46	963.18	7.90		
	6	23.00	7.12	0.22	1,137.67	116.10	22.87	6.81	3.30	1,043.00	16.94	22.87	6.33	4.31	973.33	5.93		
	7	22.14	6.95	0.17	1,131.60	89.20	21.46	6.62	4.00	994.48	5.66	21.30	6.43	4.20	978.54	4.17		
	8	23.34	7.04	0.16	1,180.56	76.76	22.63	6.60	4.91	983.71	6.85	22.40	6.24	4.41	1,061.00	4.71		
	9	24.33	7.17	0.17	1,227.22	140.33	23.19	6.55	4.02	1,018.73	17.05	23.21	6.39	4.45	1,087.67	12.39	25.17	41%
	10	24.55	7.16	0.61	1,131.40	87.65	23.35	6.42	4.33	981.76	4.99	23.40	6.36	4.62	997.36	6.72	23.86	45%
	11	25.46	7.01	0.14	1,155.33	135.56	24.72	6.46	5.12	968.26	6.86	24.40	6.22	5.27	996.07	9.25	26.00	44%
	12	25.53	7.16	0.94	1,201.75	132.00	25.08	6.58	5.00	948.33	4.54	24.63	6.40	5.89	955.98	2.55	24.63	48%
	13	25.25	6.79	0.22	1,113.83	77.05	25.06	6.58	4.53	983.09	12.13	24.84	6.20	5.13	951.59	4.38	26.97	52%
	14	25.03	7.08	0.14	1,117.70	93.13	24.71	6.61	4.22	976.66	7.55	24.45	6.34	5.24	958.97	4.86	25.40	45%
	15	26.27	7.00	0.21	1,139.00	93.68	26.03	6.43	3.40	1,026.97	7.05	25.82	6.27	4.90	976.43	4.98	24.55	54%
	16	26.95	7.25	0.09	1,129.50	148.50	26.38	6.88	3.79	1,061.50	15.35	26.20	6.57	5.06	1,020.23	16.10	29.30	37%
ETAPA 1	17	27.23	7.25	0.11	989.77	94.16	26.81	6.82	3.81	849.28	5.80	26.38	6.37	5.26	1,012.35	5.14	27.47	45%
	18	28.19	7.29	0.16	946.32	175.23	27.41	6.74	4.46	987.98	10.44	27.36	6.63	4.80	974.44	9.83	28.40	47%
	19	28.58	7.18	1.50	806.25	141.73	27.90	6.75	4.52	727.21	7.73	27.93	6.43	5.15	727.36	2.78	28.80	58%
	20	29.09	7.24	0.19	943.53	143.06	27.93	6.71	4.76	924.03	5.91	27.53	6.52	5.63	793.82	4.38	28.25	65%
ETAPA 2	21	29.46	7.21	0.15	926.32	208.00	28.70	6.59	4.19	866.18	5.61	28.46	6.48	5.08	902.56	2.29	28.52	60%
	22	28.43	7.14	0.14	965.84	145.70	27.80	6.69	4.93	816.66	4.60	27.64	6.30	5.74	825.61	1.83	27.91	59%
	23	29.03	7.04	0.23	883.75	77.50	28.40	6.69	5.42	833.45	3.92	28.63	6.53	5.66	893.90	2.11	26.50	71%
	24	29.51	7.20	1.05	919.17	136.32	28.68	6.66	4.90	828.33	5.97	28.59	6.51	4.94	862.80	2.96	27.34	65%
ETAPA 3	25	28.88	6.88	0.30	899.86	78.94	28.42	6.54	4.04	851.53	5.47	28.29	6.29	4.27	891.22	2.26	28.10	64%
	26	29.03	7.00	0.42	896.19	120.03	28.49	6.42	3.49	833.64	3.39	28.33	6.21	4.39	799.99	2.68	27.82	66%
	27	28.20	7.01	0.37	1,042.73	134.11	27.61	6.44	5.37	924.56	5.71	27.54	6.30	6.12	1,013.43	3.54	27.30	61%
	28	27.59	7.42	1.13	958.88	162.34	27.08	6.47	5.64	877.05	6.17	26.93	6.37	5.03	914.33	4.42	26.02	62%
ETAPA 4	29	26.13	7.05	0.15	894.43	126.90	25.57	6.42	3.86	826.50	4.78	25.57	6.25	3.57	820.23	3.59	25.75	61%
	30	26.62	6.97	0.15	906.06	86.16	26.28	6.29	3.83	856.66	2.18	25.96	6.15	4.59	901.96	3.55	25.63	62%
	31	26.14	7.03	0.14	953.56	61.69	26.13	6.25	5.14	870.47	5.33	25.99	6.10	4.89	906.60	5.24	25.80	64%
	32	24.39	7.08	0.16	992.71	95.19	24.15	6.24	4.48	931.84	5.07	24.04	6.02	4.99	917.60	2.52	23.55	68%

Tabla 8-7 Resultados de los parámetros semanales para el punto de monitoreo AH

ETAPAS	Fecha	AH (Afluente de los Humedales)									
		SST	DBO ₅	DQO	NT	N-NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PT	CF	HIERRO
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	07/10/2016			327.00							
	14/10/2016			277.00							
	21/10/2016			193.00							
	27/10/2016			213.00							
	03/11/2016	35.00	99.38	141.00							
	10/11/2016	31.43	57.38	137.00							
	15/11/2016	18.50	47.76	127.00							
	23/11/2016	40.50	79.26	167.00							
ETAPA 1	04/01/2017	40.50	96.44	175.00							
	11/01/2017	12.00	83.97	134.00	48.00	42.00	5.00	8.60			
	25/01/2017	13.50	91.84	158.00		44.00	3.00	9.70			
	26/01/2017	10.50	82.23	138.00	117.00	41.00	7.00	15.60	14.50	4.90E+05	
ETAPA 2	01/02/2017	15.00	80.04	184.00	157.00	44.00	4.00	7.20			
	10/02/2017	36.00	77.72	154.00		36.00	2.00	6.30			
	15/02/2017	14.50	60.21	196.00	167.00	41.00	6.00	6.60			
	22/02/2017	14.00	51.90	139.00	176.00	37.00	3.00	6.90	16.20	4.70E+04	
ETAPA 3	02/03/2017	22.50	49.75	173.00		39.00	7.00	17.30			
	15/03/2017	30.75	66.05	201.00	158.00	38.00	3.00	4.60			
	23/03/2017	30.50	70.50	192.00	176.00	40.00	27.00	17.20			
	30/03/2017	23.75	60.72	152.00	173.00	43.00	28.00	13.60	10.20	4.90E+06	
ETAPA 4	06/04/2017	25.00	77.75	203.00	142.00	35.00	31.00	17.90			
	19/04/2017	17.00	66.00	231.00	131.00	48.00	31.00	17.10	18.00		
	26/04/2017	15.00	96.76	185.00	191.00	47.00	29.00	13.90			
	26/04/2017	13.00	73.77	180.00		44.00	25.00	0.00		5.40E+06	0.1660

Tabla 8-8 Resultados de los parámetros semanales para el punto de monitoreo EH-1

ETAPAS	Fecha	EH-1 (Efluente del Humedal H-1)									
		SST	DBO ₅	DQO	NT	N-NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PT	CF	HIERRO
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	07/10/2016			62.00							
	14/10/2016			81.00							
	21/10/2016			37.00							
	27/10/2016			40.00							
	03/11/2016	13.00	9.18	21.00							
	10/11/2016	3.50	5.65	23.00							
	15/11/2016	2.75	4.52	26.00							
	23/11/2016	7.50	5.10	28.00							
ETAPA 1	04/01/2017	7.00	6.91	44.00							
	11/01/2017	1.25	4.07	26.00	44.00	6.00	1.23	35.00			
	25/01/2017	0.75	3.17	18.00		1.00	1.00	23.90			
	26/01/2017	3.00	2.67	24.00	98.00	5.00	0.57	33.60	11.40	3.30E+04	
ETAPA 2	01/02/2017	4.00	3.97	46.00	122.00	3.00	0.29	21.50			
	10/02/2017	3.50	6.05	57.00		4.00	0.23	27.60			
	15/02/2017	2.50	3.63	51.00	115.00	5.00	0.25	22.40			
	22/02/2017	2.50	5.76	24.00	128.00	5.00	0.30	21.90	12.40	2.10E+02	
ETAPA 3	02/03/2017	5.00	5.99	59.00		12.00	0.28	9.70			
	15/03/2017	3.25	7.01	30.00	139.00	5.00	0.35	24.70			
	23/03/2017	5.25	2.38	39.00	140.00	8.00	1.23	34.50			
	30/03/2017	3.50	5.00	42.00	147.00	11.00	0.81	34.50	8.00	1.60E+05	
ETAPA 4	06/04/2017	7.25	3.47	116.00	120.00	15.00	1.31	18.80			
	19/04/2017	9.00	11.20	24.00	100.00	11.00	0.74	29.50	14.30		
	26/04/2017	6.00	5.32	40.00	147.00	16.00	0.60	27.60			
	26/04/2017	7.67	13.24	44.00		16.00	0.87	20.20		9.20E+05	0.1430

Tabla 8-9 Resultados de los parámetros semanales para el punto de monitoreo EH-2

ETAPAS	Fecha	EH-1 (Efluente del Humedal H-1)									
		SST	DBO ₅	DQO	NT	N-NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PT	CF	HIERRO
ETAPA - PUESTA EN MARCHA	07/10/2016			52.00							
	14/10/2016			46.00							
	21/10/2016			29.00							
	27/10/2016			44.00							
	03/11/2016	5.00	3.13	15.00							
	10/11/2016	5.25	6.82	22.00							
	15/11/2016	5.75	2.51	36.00							
	23/11/2016	10.00	6.45	30.00							
ETAPA 1	04/01/2017	2.25	2.76	26.00							
	11/01/2017	1.25	2.47	27.00	38.00	5.00	0.27	35.00			
	25/01/2017	2.50	1.83	13.00		0.00	1.00	51.20			
	26/01/2017	2.75	2.35	15.00	107.00	0.00	0.08	40.40	11.80	4.50E+03	
ETAPA 2	01/02/2017	3.25	3.78	32.00	138.00	0.00	0.03	41.80			
	10/02/2017	2.50	2.07	44.00		1.00	0.12	19.00			
	15/02/2017	2.00	3.82	38.00	106.00	4.00	0.25	20.90			
	22/02/2017	2.75	5.91	44.00	129.00	4.00	0.28	31.80	12.90	2.00E+01	
ETAPA 3	02/03/2017	4.00	3.26	48.00		10.00	0.26	13.40			
	15/03/2017	2.00	2.47	35.00	152.00	5.00	0.24	28.70			
	23/03/2017	2.50	1.65	26.00	134.00	6.00	1.03	47.40			
	30/03/2017	4.50	3.54	45.00	155.00	13.00	0.41	42.80	8.30	1.60E+05	
ETAPA 4	06/04/2017	3.50	7.22	95.00	108.00	15.00	1.45	23.00			
	19/04/2017	8.00	5.61	22.00	109.00	10.00	1.19	32.00	15.10		
	26/04/2017	8.67	5.85	36.00	159.00	11.00	0.53	28.70			
	26/04/2017	6.67	8.87	50.00		20.00	0.32	12.60		9.20E+05	0.0655

8.5. ANEXO N° 5 – PANEL FOTOGRÁFICO

8.5.1. Implementación del sistema de investigación



Figura 8-1 Humedales H-1 y H-2 contruidos de material noble



Figura 8-2 Prueba hidráulica de los humedales



Figura 8-3 Lavado del sustrato de grava gruesa (piedra chancada)



Figura 8-4 Tamizado del sustrato grava gruesa (piedra chancada)



Figura 8-5 Sustrato de grava gruesa tamizado



Figura 8-6 Tamizado del sustrato grava media (confitillo)



Figura 8-7 Lavado del sustrato de arena gruesa



Figura 8-8 Llenado del sustrato grava media (confitillo) a los humedales



Figura 8-9 Llenado del sustrato arena gruesa a los humedales



Figura 8-10 Nivelación de la superficie del medio granular



Figura 8-11 Medición de la porosidad del sustrato grava media (confitillo)



Figura 8-12 Medición de la porosidad del sustrato arena gruesa

8.5.2. Desarrollo de las plantas durante todo el proceso de evaluación experimental



Figura 8-13 Plantas del humedal H-1 en la semana 1

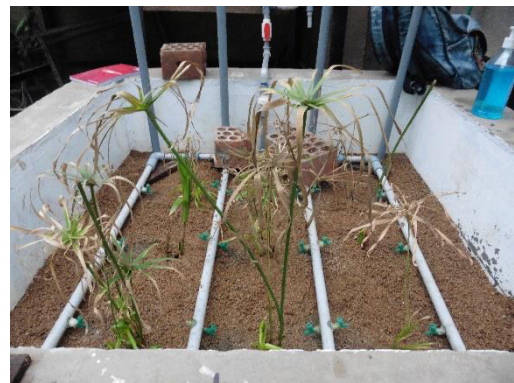


Figura 8-14 Plantas del humedal H-2 en la semana 1



Figura 8-15 Plantas del humedal H-1 en la semana 3



Figura 8-16 Plantas del humedal H-2 en la semana 3



Figura 8-17 Plantas del humedal H-1 en la semana 5



Figura 8-18 Plantas del humedal H-2 en la semana 5



Figura 8-19 Plantas del humedal H-1 en la semana 7



Figura 8-20 Plantas del humedal H-2 en la semana 7



Figura 8-21 Plantas del humedal H-1 en la semana 13



Figura 8-22 Plantas del humedal H-2 en la semana 13



Figura 8-23 Plantas del humedal H-1 en la semana 15



Figura 8-24 Plantas del humedal H-2 en la semana 15



Figura 8-25 Plantas del humedal H-1 en la semana 20



Figura 8-26 Plantas del humedal H-2 en la semana 20



Figura 8-27 Plantas del humedal H-1 y H-2 en la semana 32

8.5.3. Medición del tiempo de retención



Figura 8-28 Materiales utilizados



Figura 8-29 Momento de la medición

8.5.4. Desmontaje del sistema de investigación

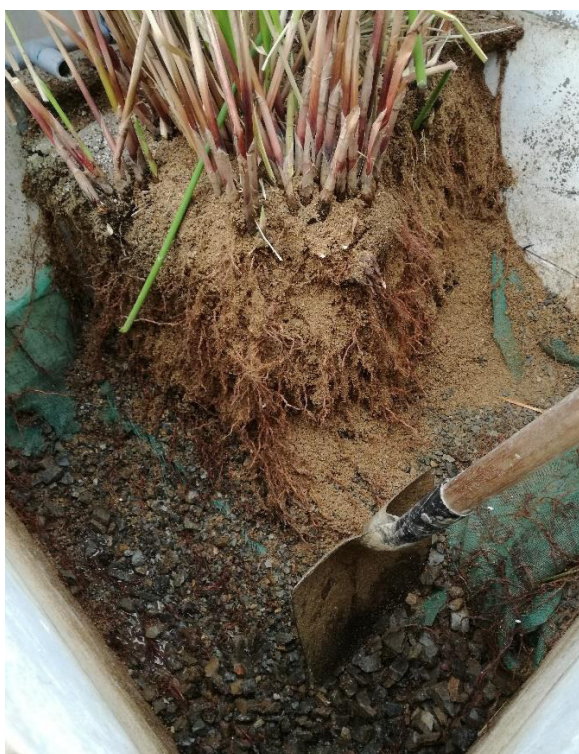
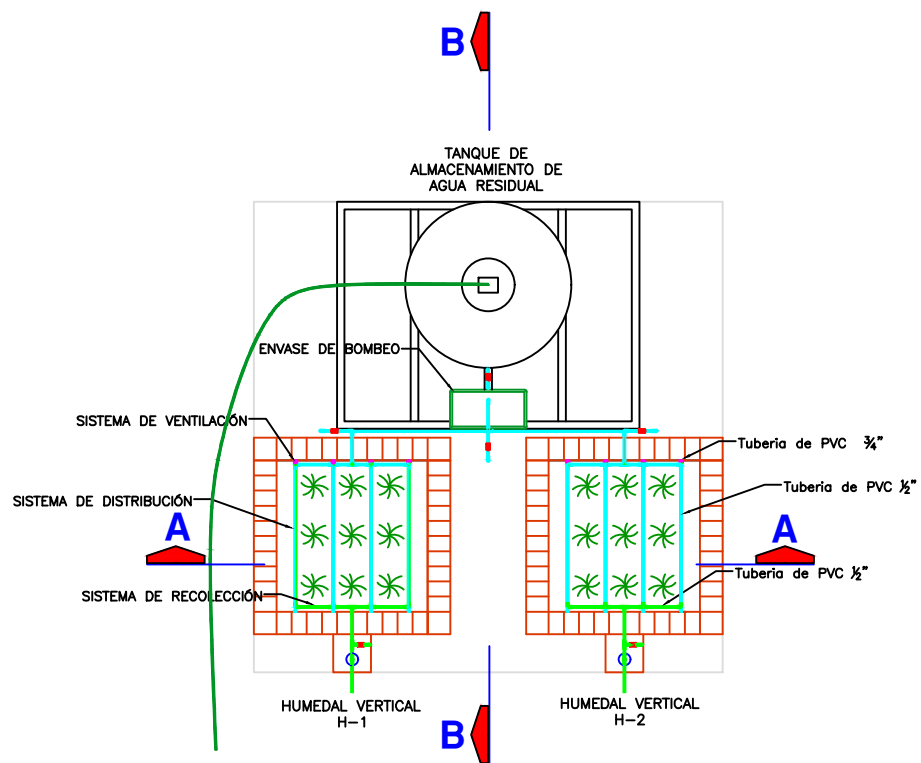


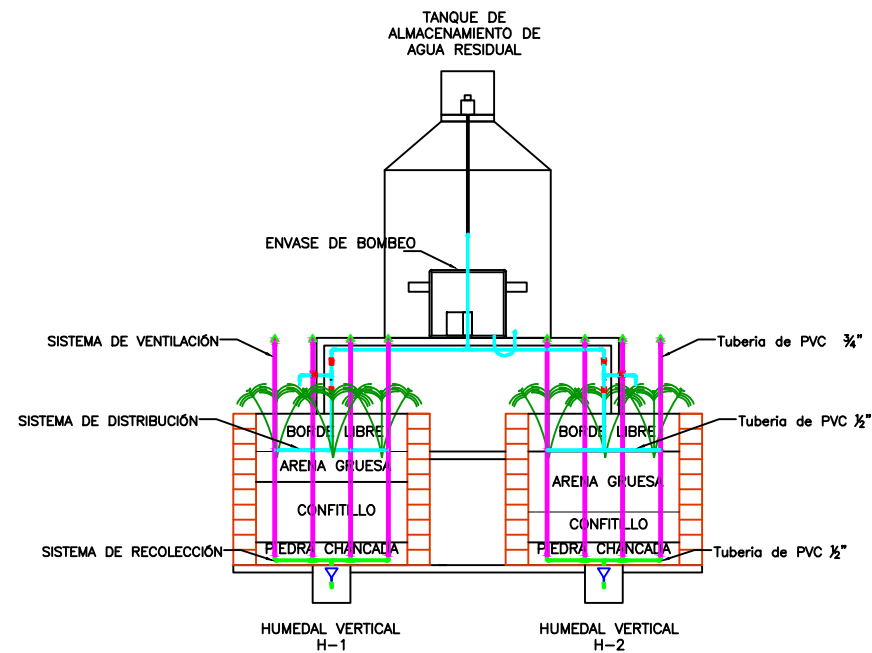
Figura 8-30 Corte longitudinal del medio granular del Humedal H-2

8.6. ANEXO N° 6 – PLANO DEL SISTEMA DE INVESTIGACIÓN



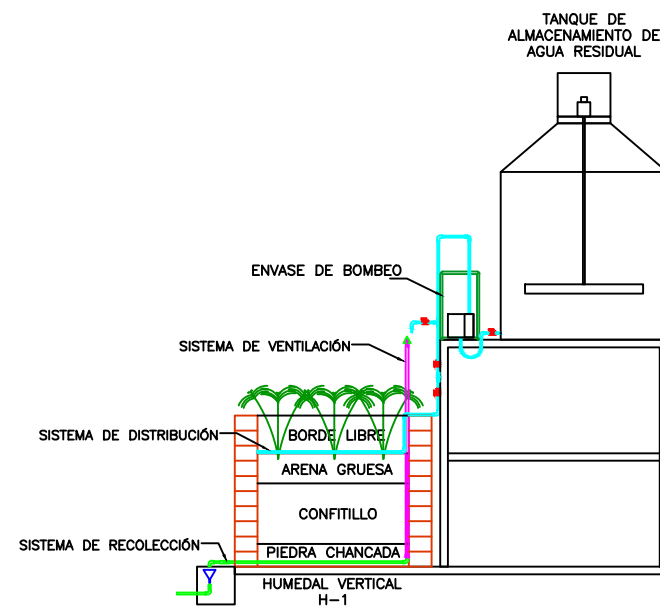
PLANTA

Esc. 1/50



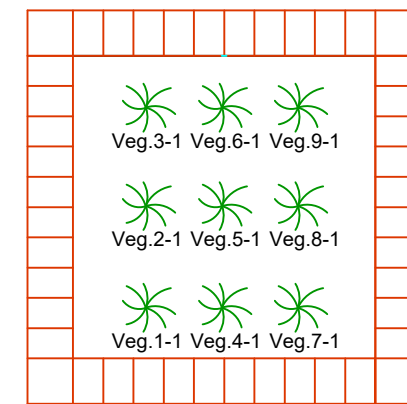
CORTE A-A

Esc. 1/50

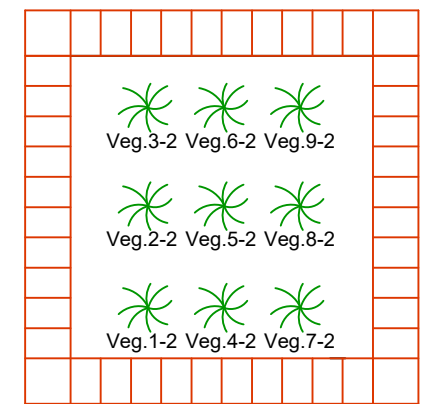


CORTE B-B

Esc. 1/50



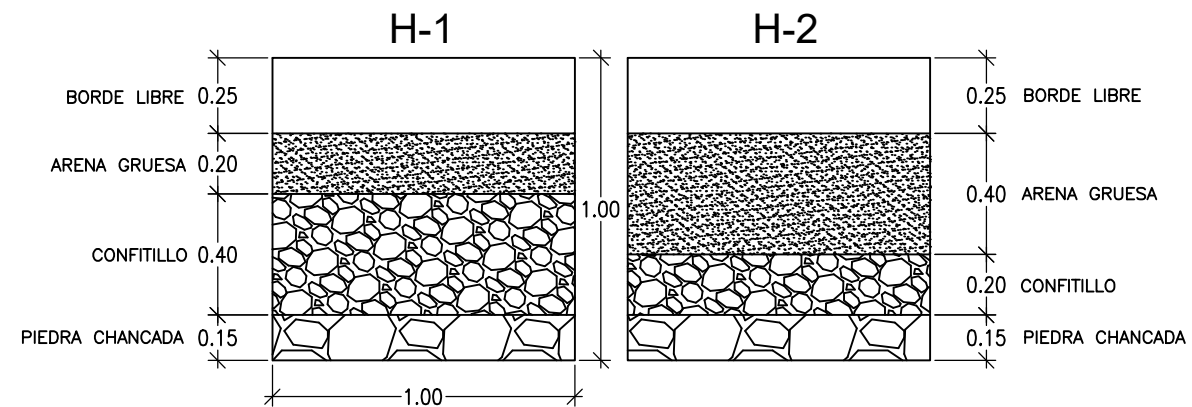
HUMEDAL VERTICAL H-1



HUMEDAL VERTICAL H-2


CODIFICACIÓN DE LOS VEGETALES

Esc. 1/25



DETALLE DEL MEDIO GRANULAR

Esc. 1/25

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
	CITRAR - FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL	
TESIS: "REDUCCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES MEDIANTE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SUB SUPERFICIAL DE FLUJO VERTICAL EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA Y LA COMPOSICIÓN DEL MEDIO GRANULAR"	TESISTA: CAROL CYNTHIA LARICO LARICO	
	ANEXO 6: PLANO DEL SISTEMA DE INVESTIGACIÓN	
	FECHA: 2021	
	ESCALA: INDICADA	
	ASESOR: ING. JUAN CARLOS ALARCON CONDOR	